

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04001

研究課題名（和文）フレキシビリティを有する配電システムの保護システムの構築

研究課題名（英文）Construction of Protection Systems for Distribution System with Flexibility

研究代表者

青木 睦（Aoki, Mutsumi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：70362316

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：現在の配電システムは、各フィーダにおいて線路の事故検出および遮断を行っている。太陽光発電システムなどのインバータ型電源である分散型電源の連系が拡大した場合、従来の保護システムが適切に動作できないことが考えられる。シミュレーションの結果、インバータの過電流抑制機能により、変電所の保護システムへの影響は小さいが、長距離配電線ではその影響が大きくなることを示した。また、配電システムが上位システムと切り離されて独立システムとして運用する場合を想定し、需要家の保護方式について検討した結果、インバータの過電流抑制レベルを適切に設定し、事故電流の方向を判定する保護リレーにより、保護が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来のカーボンニュートラルの達成やエネルギーの安定供給の観点から、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーを活用した発電システムの導入が進んでいる。また、需要家レベルにおいてもエネルギーの多様化が進められ、燃料電池などのコ・ジェネレーションシステムの導入も拡大すると予想される。これまでは、電圧に関する問題や高調波問題など電力品質改善に関する研究が行われているが、系統故障や系統事故時に適切に対応できる保護システムの構築も将来の重要な課題である。本研究は、複数のインバータ型電源が連系された配電システムにおける系統事故時の現象を明らかにし、今後の保護システムの構築に関する知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In the current power distribution system, protection relays detect line faults on each feeder and disconnect the line. When the interconnection of distributed power sources, which are inverter-type power sources such as photovoltaic power generation systems, is expanded, the conventional protection system may not be able to operate properly. Simulation results show that the overcurrent suppression function of the inverter has a small impact on the protection system at the distribution substation, however the impact is greater for long-distance distribution lines. In addition, assuming that the distribution system is disconnected from the upper system and operated as an independent system, we examined the protection system for consumers and showed that protection is possible by setting the appropriate overcurrent suppression level of the inverter and by using a short-circuit directional protection relay that detects the direction of the fault current.

研究分野：電力システム工学

キーワード：配電システムの保護システム 分散型電源

1. 研究開始当初の背景

近年、世界的なエネルギー安定供給の観点から、太陽光発電(Solar Photovoltaics generation system: PV)や風力発電など再生可能エネルギーを活用した発電システムの導入が進んでいる。また、需要家レベルにおいてもエネルギーの多様化が進められ、燃料電池などのコ・ジェネレーションシステムの導入も拡大すると予想される。これに伴い、配電系統レベルでは、分散エネルギーリソース(Distributed Energy Resources : DER)の増加に対応した新しい電力システムに関する研究が数多く行われている。その例として、STATCOM や蓄電池などの各種電圧制御機器の制御法の開発などの研究がある。近年では、仮想発電所(Virtual Power Plant : VPP)なども注目されている。このような将来の配電系統においては、電圧の適正範囲維持や保護システムの感度低下等の問題が懸念されている。

これまでの配電系統保護システムは、変電所に設置された過電流リレーや地絡過電圧リレー、地絡方向リレーにより、故障を検知し、変電所の送り出し点に設置された配電線用遮断器(Feeder Circuit Breaker : FCB)によって、故障配電線の遮断が行われていた。今後、再生可能エネルギーを利用した DER が増加した場合、複数の DER や、急速に普及が進む電気自動車や定置型蓄電池も統合して、仮想発電所(Virtual Power Plant : VPP)などの小規模の電力システムを構成し、電力システムの需給調整や安定化に資することが検討されている。このため、配電線の故障電流の分布が複雑になり、これまでの保護リレーシステムでは、適切に故障を検出できないことが懸念される。このような将来の配電系統において保護方法の具体的な方策が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、VPP などの小規模電力システムを含む将来の配電システムにおいて、多地点同期計測システム(Phasor Measurement Unit : PMU)による状態監視および、それによる系統の状態把握、そして、その状態に応じた適切な保護方法を提供する保護システムを確立することを目的とする。

(a) Intelligent Electronic Device(IED)による配電系統の状態把握システムの検討

計測・保護・制御機能を有する IED を配電線の線路中の区分開閉器(Section Switch : SSW)に複数設置し、これを時刻同期することにより、PMU として活用する。そして、これらの PMU から収集した情報を元に、各時間断面の配電系統の状態を表すモデルを構築する。

(b) 配電系統の状態推定をベースにした保護リレーの整定値の決定方法の検討

複数地点の情報から各時間断面において得られた配電系統モデルをもとに、そのときの、保護リレーが適切に動作するように最適な整定値を求める。

(c) Power Conditioning Subsystem(PCS)と連動した保護システムの検討

将来の配電系統においては、環境の変化(DER, 電気自動車の増加)を想定して、DER の導入量が増えると予想される。系統故障時は、これらの装置や機器から故障電流が供給されることが予想され、既存の保護装置では、適切に動作できなくなると考えられる。これに対し、故障時に、IED からの指令により、Power Conditioning Subsystem(PCS)から供給される故障電流を抑制し、FCB や SSW を適切に動作させる保護システムを確立する。

3. 研究の方法

現在の配電系統から将来の配電系統にシームレスに移行していくことを考慮し、既存の系統をベースにしたモデル系統において、DER を増加させた将来の配電系統モデルを構築し、短絡故障や地絡故障などの各種の故障状態を模擬したシミュレーションを行う。次に、系統の状態推定をベースにして適切な保護リレーの整定値を決定するアルゴリズムを構築する。最後に、IED により実験的検証を行う。具体的には次の3つのステップで研究を実施し、将来の配電系統において適切な保護システムを確立することを目標として実施する。

(1) 状態把握システムの導出

DER が大量に連系された配電系統モデルにおいて、配電線の複数地点に設置された IED からの情報収集を模擬するシミュレーションモデルを構築する。次に、このシミュレーションモデルにおいて、配電線の状態を推定するアルゴリズムを開発する。

(2) 保護リレーの最適な整定値の検討

将来の配電系統モデルにおいて、様々な条件において、故障電流の分布を把握する。そして、この故障電流分布と配電系統の状態推定結果との関係性を調べ、配電系統の状態に応じた適切な整定値の決定アルゴリズムを構築する。

(3) PCS との協調制御の構築と IED による実験検証

系統故障時に、PCS からの故障電流を抑制する制御アルゴリズムについて検討する。そして、IED に、本研究で構築したアルゴリズムを実装し、将来の配電系統における故障電流を模擬した電圧、電流波形を IED に入力して、手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 回帰木による状態把握

図 1 に示すシミュレーションモデルを用いて、回帰木により、電力を有効・無効電力を推定する。推定箇所はノード 1-2 間、4-5 間、9-10 間である。系統の先端と中間、末端の地点を推定対象とした。回帰木モデルの入力には送り出し電圧、配電用変電所直下の有効・無効電力、SVR1、SVR2 のタップ位置とした。出力結果として指定したノード間の有効・無効電力を設定した。また、回帰木モデルへの入力として配電用変電所における配電線の送り出し電圧、送り出しの有効と無効電力、および、SVR1 と SVR2 を通過する有効・無効電力とした。

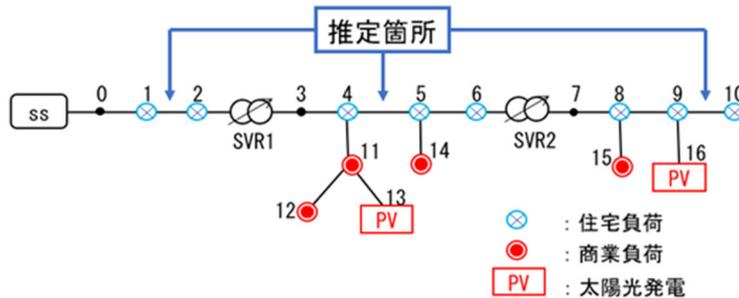


図 1 シミュレーションモデルと推定箇所

学習データは様々な状況を網羅するために潮流計算の条件を段階的に変化させて作成した。図 1 のシミュレーションモデルにおいて、送り出し電圧、住宅負荷、商業負荷、PV 出力、2 つの SVR のタップ位置を変化させて潮流計算を行い、学習データとして作成する。これらの条件によって潮流計算を行い、1,185,951 件の学習データを獲得した。テストデータも同様にシミュレーション上で潮流計算を行い作成した。住宅負荷、商業負荷と、PV 出力については乱数を用いて作成し、送り出し電圧、SVR タップ位置については段階的に変化させた。テストデータとして合計 111,375 件作成した。

回帰木による有効電力と無効電力の推定結果を表 1 に示す、電力の値が 0 に近い値になるところがあるため、絶対誤差は小さいが、相対誤差が 100%と大きくなってしまったことがあった。特異的な部分を除けば 10%以内の相対誤差以内で推定することができた。

表 1 数値結果

推定箇所	推定対象	最大誤差(%)	RMSE(%)
地点 1-2	有効電力	44.6	4.76
地点 4-5	有効電力	99.7	6.41
地点 9-10	有効電力	100	2.06
地点 1-2	無効電力	13.0	1.13
地点 4-5	無効電力	4.19	0.51
地点 9-10	無効電力	100	0.57

(2) 保護リレーの最適な整定値の検討

(a) 分散型電源が大量連系された場合の事故時の影響

太陽光発電システムや蓄電池システムなどの DER が多数連系された場合の事故時の基礎検討として、図 2 に示すシミュレーションモデルを作成した。太陽光発電システムと蓄電池システムは、三相 PWM インバータとしてモデルを構築し、それぞれ定電力制御を行うものとした。また、各インバータは、半導体スイッチング素子の保護を目的として、事故時の過電流を抑制することが行われていることから、事故時に過電流を検知した場合には、定電力制御から定電流制御に切り替えるものとした。このとき、定格電流の 1.5 倍程度に抑制するものとした。

この配電システムモデルの需要家⑥の受電点において三相短絡が生じた場合のシミュレーションを行った。そのときの配電用変電所送り出し点の電圧と電流の波形を図 3 に示す。図に示すように、DER の発電量と負荷の消費電力を同程度に設定した場合、事故前は、電力供給の電流と負荷の消費電流が同程度になるため、配電用変電所での電流が非常に小さくなっている。シミュレーション開始後、1 秒の時点で三相短を発生させた場合、電圧は非常に小さくなる一方、電流は非常に大きくなった。これは、事故時に各インバータの過電流抑制機能によるもので、このことより、事故時の電流が抑制され、変電所から大きな事故電流が流れることが分かった。

当初、分散型電源が多数連系された場合、分散型電源から多くの事故電流が供給されることが想定された。しかし、インバーの過電流抑制機能により、分散型電源からの事故電流は抑制され、IED から電流抑制指令を行うことなく、変電所の過電流リレーが動作できると考えられる。そこで、様々な条件における系統事故に対して検討を行った。

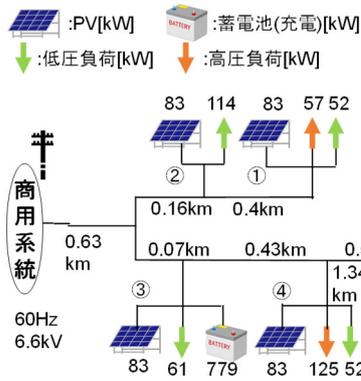


図2 シミュレーションモデル

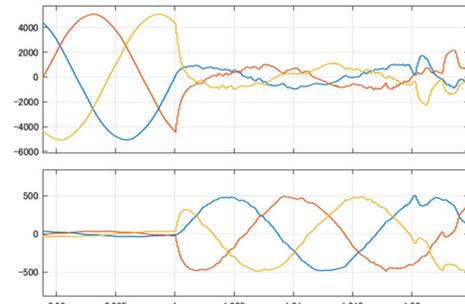


図3 上位系統との連系点における電圧波形(上段), 電流波形(下段)

(b)長距離配電線における事故時の分散型電源の影響

次に、短絡事故時の事故電流が小さくなる長距離配電線において、分散型電源による影響を分析するために、図4のモデルで検討を行った。このモデルは、長距離配電線を想定して、配電線の亘長を12 kmとした。そして、分散型電源の様々な連系形態を想定して、分散型電源が系統上に分散して連系した場合と集中して連系した場合を想定した。なお、分散型電源の影響を検討するため、負荷は考慮していない。各分散型電源は前記のモデルと同様に、三相PWMインバータとしてモデルを構築し、それぞれ定電力制御を行うものとした。また、各インバータは、事故時に過電流を検知した場合には、定電力制御から定電流制御に切り替えるものとした。

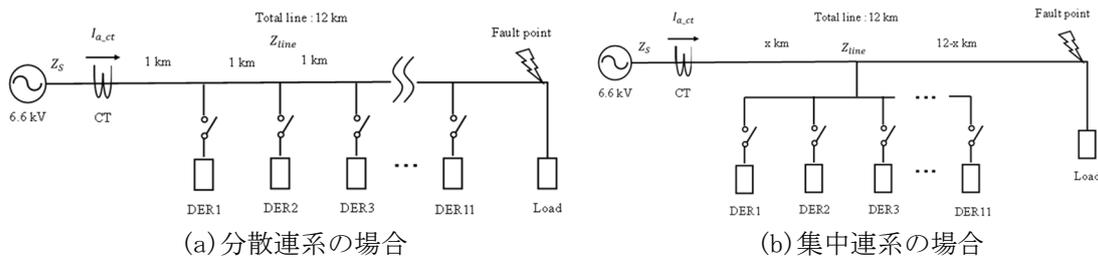


図4 シミュレーションモデル

このモデルにおいて、各分散型電源の発電量を100 kWから500 kWまで増加させた場合において、系統の末端で三相短絡を発生させた場合の変電所送り出し電流のシミュレーション結果を図5に示す。また、集中連系とした場合の連系地点を変電所から1 km, 6 km, 11 kmとしている。なお、分散型電源が非連系時に配電線を通る線電流の実効値は652 Aである。過電流リレーの整定値を600 Aとすると、分散型電源が非連系時には過電流リレーは適切に動作できる。一方、分散型電源が、系統上に分散して連系した場合は、過電流リレーの整定値である600 Aを下回る場合があり、過電流リレーが動作できないことがあることが分かった。また、集中連系で、連系地点が系統の中間付近の場合は、分散連系と同様の傾向を示している。また、連系地点が系統の末端付近の11 kmの場合は、分散型電源の容量によらず、600 Aを下回ることにはなかった。このことから、長距離配電線では、分散型電源の連系が少ない場合でも過電流リレーの整定が困難であり、分散型電源の連系によって、過電流リレーが動作できなくなることが分かった。この対策として、事故前と事故時の変化分を用いるリレーの適用などが考えられる。この検討については、今後の課題としたい。

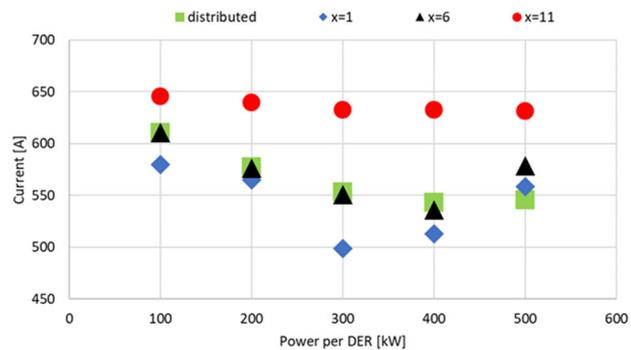


図5 シミュレーション結果

(c)上位系統との連系を開放し独立系統とした場合の事故時の分散型電源の影響

次に、事故時の保護が難しくなるケースとして、配電線が上位系統との連系が切り離され、独立系統として運用している場合を想定した。このモデルにおいて、上位系統との連系が切り離さ

れているので、需要家に設置された保護リレーにより保護を行う必要がある。需要家構内のモデルの例を図7に示す(需要家⑦)。

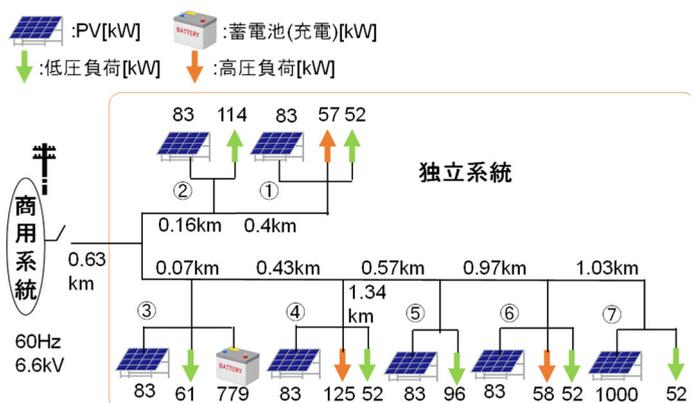


図6 シミュレーションモデル

需要家①の構内での事故を事故点1とし、図7に示す需要家⑦の校外の事故を事故点2、構内の事故を事故点3とする。

このモデルにおけるシミュレーション結果を図8に示す。事故時には、分散型電源のインバータでは、過電流抑制が行われるが、過電流リレーが動作できるように、インバータの過電流抑制レベルを定格電流の1.5倍とし、過電流リレーの整定値をインバータの定格電流の1.3倍としている。需要家⑦の構内の事故か、構外の事故かは、短絡方向リレーにより判定可能であることが分かった。なお、今回は、保護リレーの整定値を定格電流の1.3倍としたが、実際には、分散型電源の発電量や負荷の消費電力は時々刻々変化するもので、適切な整定値を検討する必要がある。また、地絡事故については、従来の保護システムで検出可能である。

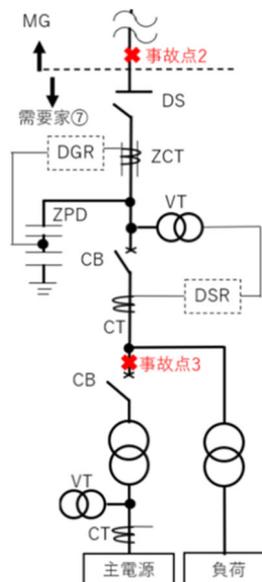


図7 需要家⑦構内のモデル

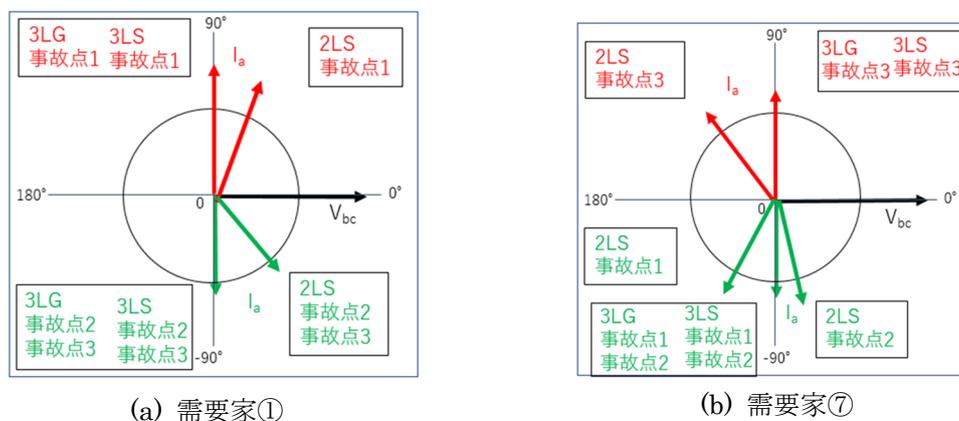


図8 需要家の連系点の電圧と電流のベクトル図

(4)まとめ

現在の配電系統は樹枝状構成となっており、配電用変電所における各フィーダにおいて線路の事故検出および遮断を行っている。太陽光発電システムなどの再生可能エネルギーによる電源や定置型の蓄電池システムの導入が拡大した場合、それらのエネルギーリソースからも事故電流の供給がなされ、配電用変電所における保護システムが適切に動作できないことが考えられる。インバータ型の電源が多数連系した配電系統モデルでシミュレーションを行った結果、インバータの過電流抑制機能により、変電所の保護システムへの影響は小さいが、分散型電源の連系量が増加すると変電所における事故電流が減少することが確認できた。そこで、過電流リレーの整定値を可変とすることや電流の変化分を用いることによって、事故の検出ができることが考えられる。また、保護が難しくなるケースとして、配電系統が上位系統と切り離されて独立系統として運用する場合を想定し、エネルギーリソースを有する需要家の保護方式について検討した結果、インバータの過電流抑制レベルを適切に設定し、事故電流の方向を判定する方向過電流リレーにより、保護が可能であることを確認した。インバータ型電源が大量に連系された場合の配電系統の保護システムの構築は、今後も重要な課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------