

令和 3 年 6 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04103

研究課題名(和文)複数点連系型配電システムの制御および保護システムの開発

研究課題名(英文) Development of Control and Protection System for Multi-point Interconnected Distribution System

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、再生可能エネルギーによる分散電源などの大量連系に対応できる複数点連系型配電システムの制御システムおよび保護システムの開発を目的とするものである。配電線(回線)どうしの連系をする場合に別の変電所の配電線となり、変電所間の電圧の位相差が大きいと回線間の電流が大きくなる課題がある。本研究では、このような場合にも潮流制御可能な新型直列型電圧制御機器として、サイリスタとトランジスタのハイブリッド型の直列電圧制御機器を提案した。また、ループ運用時のSVRの設置位置、および、ループパワーフローコントローラの制御法を構築した。さらに、保護システムの基礎的検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電などの再生可能エネルギー電源が大量に連系された場合の配電システムの電圧適正範囲維持は、将来の配電システムにおいて重要な課題である。変電所間の位相差を考慮した複数回線の配電線を連系した配電システムに関する電圧制御機器の検証や新しい直列電圧制御機器の開発は、過去にも研究事例があまりなく、配電システム運用の幅を広げる実用性が高いものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a control system and protection system for a multi-point interconnected distribution system that can support mass interconnection of distributed power sources using renewable energy. There are problems that when the substations of the distribution line are separate and the phase difference of the voltage between the substations is large, the current between the lines becomes large. In this research, it is proposed that a series voltage control device consisting of thyristors and transistors as a new series voltage control device that can control the power flow even in such a case. It is also constructed that the SVR installation position during loop operation and the control method for the loop power flow controller, and verified its effect by simulation. In addition, the basic configuration of the protection system was examined.

研究分野：電力システム工学

キーワード：配電システムのループ運用 ループパワーフローコントローラ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 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分散電源 (Distributed Energy Resources: DER) の導入が進んでいる。我が国の放射状配電系統において DER の導入量は、電圧の制約によるところが大きいため、DER からの発電量変動に伴う電圧逸脱や電圧変動の解消に主眼が置かれている研究が多い。これまでの研究は、特定の時間断面(たとえば、2030 年など)における DER の導入量のみを想定し、既存の放射状配電系統に対して、SVR や SVC などの制御機器の配置や制御方式を検討しているものが多く、制御の目的も電圧変動など特定の事象のみに着目したものがほとんどである。また、今後、再生可能エネルギーを利用した DER が急速に増加した場合、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系統を構成し、電力系統の需給調整や安定化に資することが検討されている。これに対し、これまでの研究は、小規模な規模での実証試験で行われていることが多く、具体的にどのような形で小規模電力系統を構成すればよいのか示されている例はほとんどない。さらに、小規模電力系統においては、損失最小化、電圧変動抑制、電圧不平衡・高調波(高次高調波、次数間高調波を含む)などの電力品質維持方策は大規模系統よりも困難であり、将来の新しい電力系統において制御方法や保護方法について、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、小規模電力系統の実現に向けて、複数点連系型配電システム (Multiple-Interconnected Distribution System: MIDS) の構築が不可欠であると考え、その制御・保護システムを確立することを目的とする。

#### (1) MIDS の構成要素となる直列型電圧制御機器 (Advanced Series Regulator: ASR) の開発

これまで研究を行ってきたサイリスタとトランジスタのハイブリッド型の直列電圧制御機器の構成と制御法を高度化し、隣接配電線と複数箇所 で連系して潮流や電力品質維持制御を行う ASR を開発する。

#### (2) MIDS の損失最小化を図る潮流制御方式の確立

複数箇所 で連系した系統構成において、各パワーエレクトロニクス機器のネットワークを構築し、環境の変化 (DER, EV の増加) を想定して、DER の導入量の変化に対し、エネルギー損失最小化、電圧の適正範囲維持を図る制御方式を確立する。

#### (3) 区分開閉器に組み込まれた IED による MIDS の保護システムの開発

IED を組み込んだ区分開閉器の開発により、MIDS の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 MIDS へのシームレスに移行していくことを考慮して、既存の系統をベースにしたモデル系統において、放射状系統制約を外した場合の最適な系統構成の検討、および、保護システムの高度化を行う。次のステップとして、エネルギー損失最小化を維持しながら無効電力制御および高調波などを抑制する各機器の協調的制御法について検討を行い、リアルタイム・デジタルシミュレータ (Real Time digital Simulator: RTS) により実験的検証を行う。

#### (1) 配電線の潮流を最適に制御する新型直列型電圧制御機器 (ASR) の開発

ASR について、低コストかつ小型で実現するため、サイリスタとトランジスタのハイブリッド型の直列電圧制御機器とその潮流制御法を開発する。

#### (2) MIDS におけるパワーエレクトロニクス機器の制御方法の開発

MIDS において、電圧維持や配電線損失を低減するための潮流制御方式について検討を行う。

#### (3) MIDS の系統故障時の応動評価と保護システムの構築

電力系統モデルを実時間でシミュレーションできる RTS を用いて、系統故障時に対して、IED を用いた保護システムの応動評価を行い、その有効性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 直列型電圧制御機器 (ASR) の開発

本研究で提案する直列型電圧制御機器 (ASR) の構成を図 1 に示す。ASR は、サイリスタを用いたタップ切換回路とインバータ回路を持ち、インバータの直列変圧器側の出力部とタップ切換回路の出力部が直列につながれた状態で直列変圧器に接続されている。並列変圧器は配電線に対し並列に  $\Delta$  結線で接続されており、直列変圧器が  $u$  相に接続されたタップ切換回路には  $v$  相と  $w$  相の線間電圧が出力されるようになっている。したがって、並列変圧器とタップ切換回路は移相変圧器として機能している。従来の位相変圧器と異なる点の一点目は、タップ切換回路にサイリスタを採用している点である。これは、PV が大量に連系された配電系統において問題となっている急峻な電圧変動に対応するためである。二点目は、並列変圧器の接続点を直列変圧器の中点とすることで、機器の一次側と二次側で電圧の大きさが等しくなる構成としたことであ

る。図2に示すように、 $v$ 相と $w$ 相の midpoint の線間電圧が並列変圧器のタップ切換回路と直列変圧器を介して、 $u$ 相の配電線に対して出力されるため、出力電圧と $u$ 相の midpoint の電圧とが直交関係となり、機器自端の一次側配電線の電圧と二次側配電線の電圧とを大きさは等しく、位相が異なる電圧にできる。

次に、タップ切換回路とインバータ回路との直列接続によって、電圧の制御可能な範囲について説明する。図3にタップ切換回路とインバータ回路によって、ASRが自端二次側配電線の電圧を調整可能な範囲を示す。図3(a)は機器の一次側電圧を基準として実軸上に置いており、タップ切換回路とインバータ回路の電圧の合成を表している。黒い点がタップ切換回路のみを使用した場合に二次側電圧がとるベクトルを表しており、インバータ回路はその黒い点を中心とした赤い円の内側の範囲で電圧出力が可能である。タップ切換回路とインバータ回路の電圧を合成した電圧は二次側電圧となることから、図3(b)に示すように、 $\pm 3$ 段のタップ切換回路を持つ場合、6個の黒い点を中心とする各円の内側の範囲に二次側電圧を調整することができる。

この構成により、ループ点における電圧の位相差が大きい場合でも電圧を制御することが可能となる。

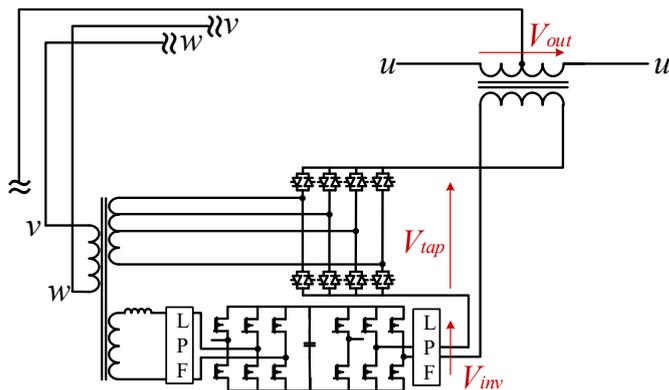


図1 ASRの構成

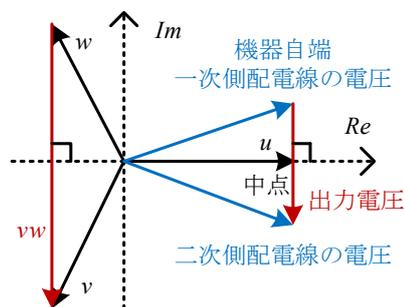
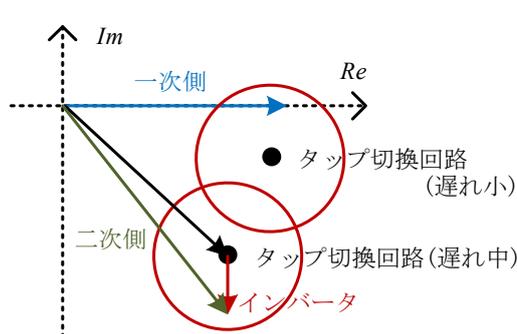
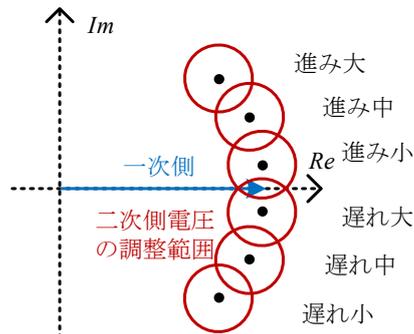


図2 ASRの出力電圧



(a)電圧の合成



(b)調整範囲

図3 タップ切換回路電圧とインバータ回路電圧の合成

## (2) MIDSにおける潮流制御方法の開発

図4に複数地点で連系する配電系統モデルを示す。各配電線を接続するループ点は、すべて末端とする。変電所を電圧源で模擬し、負荷とPVの容量に応じて差をとったものを負荷として電流源で模擬する。回線1, 2は同一バンクからの供給を想定しており、回線0はその他二つの系統とは異なる変電所からの供給を想定する。線路 $i$ の線路インピーダンスを $R_i, X_i$ として計算する。また、ループ点を含む線路の線路インピーダンスは $R_{loop1}, X_{loop1}, R_{loop2}, X_{loop2}$ とする。配電線路 $i$ でつながれた負荷を負荷 $I_{Li}$ とする。このモデルにおいて、回路計算により、線路損失を最小にするためのループパワーフローコントローラ(Loop Power Flow Controller : LPC)の出力を求めた結果、LPCの出力電流の指令値を(1)式のように導くことができた。

$$I_{loop1} = \frac{C_2 E - 2BC_1}{4AB - E^2} + j \frac{D_2 E - 2BD_1}{4AB - E^2}, \quad I_{loop2} = \frac{C_1 E - 2BC_2}{4AB - E^2} + j \frac{D_1 E - 2BD_2}{4AB - E^2} \quad (1)$$

ただし、 $A \sim E$ は、線路抵抗および負荷電流から求められる変数

そこで、3フィーダループ配電系統のモデルにおいて、各ノードの負荷とPVは電流源として模擬してシミュレーションを行った。また、低圧系統の電圧降下を最大5[V]として考慮し、電圧の適正範囲は6285.7~6725.7[V]とする。送り出しの電圧は6600[V]で一定であるとし、変電所の送り出し電圧の位相差進み15[deg]を設定した。また、一般的にLPCなどの直列器は電圧源で模擬されるが、今回は、電流源で模擬することとした。シミュレーションの結果、提案法によ

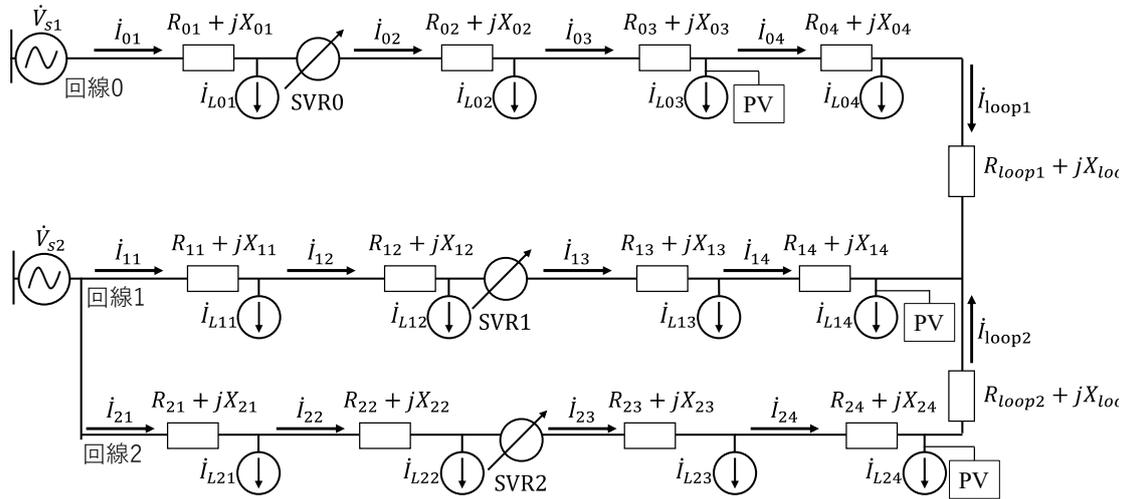


図4 損失最小化計算モデル

り、線路損失を削減できることを確認した。

次に、配電線の電圧について、図4に示すように、線路の途中で電圧調整する機器が無い場合、系統の末端で適正範囲を逸脱してしまうことを確認した。これに対し、線路の途中にSVRを設置することを考えるが、従来の樹枝状系統の場合の設置の考え方が異なり、ループ状の場合、タップ動作によって、SVRの二次側だけでなく、一次側の電圧も変化する。このことを考慮して様々な設置位置について検討した結果、図5に示すように系統にSVRを設置した場合、系統末端の電圧を適正範囲内維持することが可能となった。なお、SVRは変圧比を6375/6600～6825/6600とし、75[V]刻みで変更可能であるとした。SVRの動作時限は50[sec]とし、機械的動作時間は6[sec]と設定した。

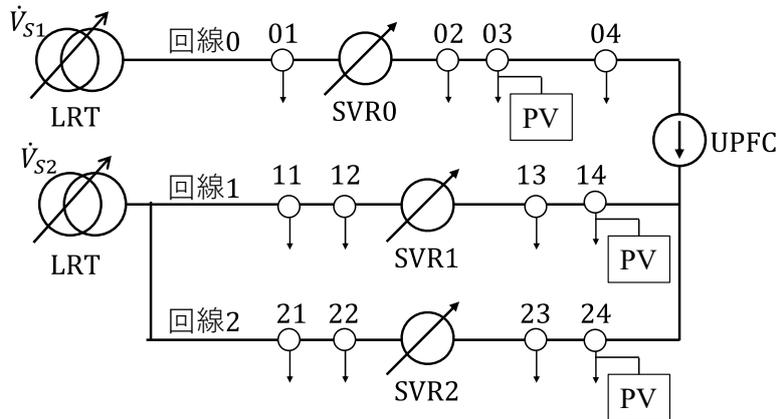


図5 3フィーダ配電システムモデル(SVR設置後)

前述の線路損失最小化制御は、負荷の電流情報が必要となる。しかし、一般的に配電系統での全ての地点の負荷電流は測定できないため、負荷電流を推定によって求めて、制御を行う方法について検討した。

まず、電圧を推定する方法として、LDC (Line Drop Compensator) の方式 (以下、LDC方式) を用いて各ノードの電圧を算出する。一般的にLDC方式はSVRやLRTの制御に用いられているもので、図6に示すように、事前に過去の一定期間の計測データを蓄積し、そのデータをもとに、電力  $P$  と電圧  $V$  の関係式 (LDC 整定式) を求め (2) 式、電圧の推定を行う。

$$\Delta V = aP + b \quad (2)$$

本研究では、SVRのタップ位置ごと、また、ノードごとにLDC整定式を求め、さらに、PVの出力の影響を考慮した、昼と夜の時間帯ごとに分けてLDC整定式を求めた。

この方法により、系統末端での電圧推定の

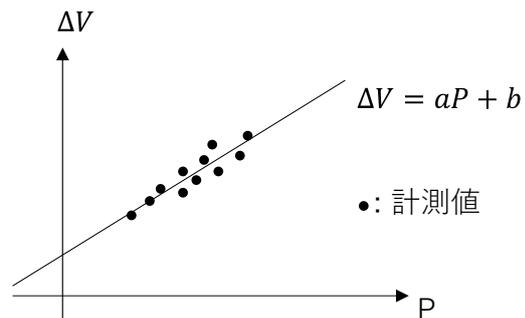


図6 LDC 整定式算出の概要

結果は、ノード 04 は最大誤差 150 [V]程度で、ノード 14 は最大誤差 130 [V]程度で、ノード 24 は最大 190 [V]程度であった。この推定結果から、各ノードの電流を求め、(1)式によって、LPC の制御を行った。推定結果を元に制御を行った場合と直接計測して制御を行った場合についてシミュレーションを行った、一日当たりの線路損失は 11 [%]増加した。

このように、LDC 方式によって電圧の大きさと位相を推定する方法を提案し、その効果をシミュレーションによって確認した。推定を用いて制御を行った結果、SVR を設置しない場合で損失の増加を 4 [%]に抑えることが可能であり、SVR を設置した場合でも 11 [%]の損失増加に抑えることが可能であると示した。また、LDC 方式の通過有効電力測定点から推定点までの間に電圧調整器が設置されている場合の推定方法について提案し、シミュレーションによって推定精度を確認した。提案法によって、3 フィーダを連系したループ系統において、変電所の情報、および、電圧制御機器間の通信のみによって制御が行えるようになった。

### (3) MIDS の保護システムの構築

複数地点で連系点を持つ MIDS では、故障電流の分布が、従来の樹枝状の配電線とは異なり、従来の配電線保護システムに影響が生じることが懸念される。そこで、これらの影響が懸念される系統においても、故障の区間判定をほぼ確実に行うことが出来る電流差動保護システムの適用を考える。送電線保護などで用いられている電流差動リレーは、故障区間を確実に検出することが可能であるが、サンプリング同期機能を要し、同期精度を確保するための高速(100Mbps 以上)の通信網を整備する必要がある。このため、配電系統に適用するためには、コストの点から課題が生じる。そこで、フェーザ情報から、対象区間の電流差分を行うことによって、サンプリング同期機能を不要とする電流差動リレーについて検討した。図 7 に示す簡易配電系統モデルをリアルタイムシミュレータに組み込み、図 7 に示す Case1~3 において地絡故障が生じた場合について検証し、Case2 の対象区間内故障であることを適切に判定することができた。

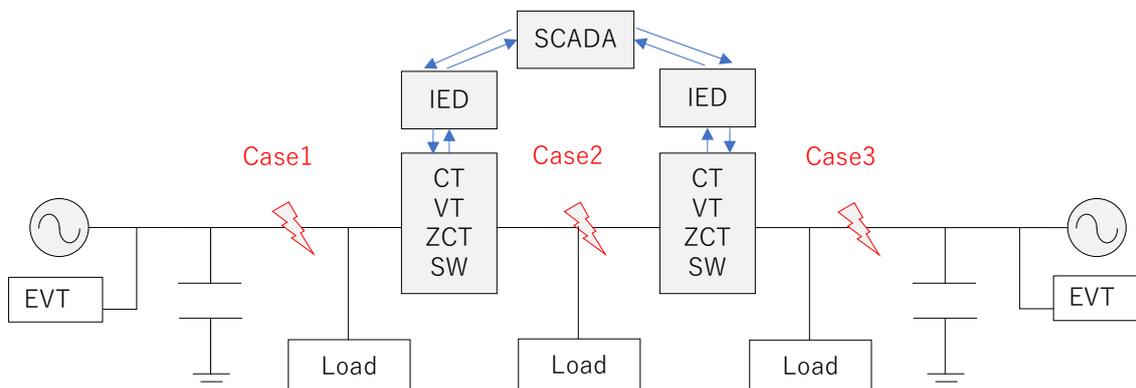


図 7 配電線保護システムの基本構成

### (4) まとめ

本研究は、将来のエネルギーシステムに欠かすことができない再生可能エネルギーによる分散電源、コ・ジェネレーションシステムや電気自動車などの大量連系に対して柔軟に対応できる高効率かつ高品質な電気エネルギー供給システムの実現を目指して、複数点連系型配電システム(MIDS)の制御システムおよび保護システムの開発を目的とするものである。

配電線(回線)どうしの連系をする場合に、別の変電所の配電線となることがある。このとき、変電所間の電圧の位相差が大きいと回線間の連系時に配電線を通る電流が大きくなるため、配電線の損失が増加してしまうという課題がある。このため、連系できる配電線の選択に制約がある。変電所間で位相差がある場合にも潮流制御可能な新型直列型電圧制御機器(ASR)として、サイリスタとトランジスタのハイブリッド型の直列電圧制御機器を提案した。次に、変電所間で位相差がある場合に、配電線のループ点に設置したループパワーフローコントローラの制御法の構築を行い、シミュレーションにより配電線の損失を削減できることを確認した。また、ループ運用時においてループパワーフローコントローラを用いない場合に、自動電圧調整器(SVR)の設置位置および制御変更による電圧制御効果についても確認したほか、地絡故障時の故障電流についてシミュレーションを行った。また、フェーザ情報から、対象区間の電流差分を行うことによって、サンプリング同期機能を不要とする電流差動リレーについて、リアルタイムシミュレータに簡易の配電系統モデルを組み込み、提案手法の有効性を確認した。

太陽光発電などの再生可能エネルギー電源が大量に連系された場合の配電系統の電圧適正範囲維持は、将来の配電系統において重要な課題である。変電所間の位相差を考慮した複数回線の配電線を連系した配電系統に関する電圧制御機器の検証や新しい直列電圧制御機器の開発は、過去にも研究事例があまりなく、配電系統運用の幅を広げることができるものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河村雄騎, 青木睦
2. 発表標題 配電系統用ハイブリッド型電力潮流制御器の基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古田賢一, 青木睦
2. 発表標題 配電系統のループ運用時における電源位相差の影響
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

〔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
---------	---------