

令和 2 年 5 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14639

研究課題名（和文）広域計測データに基づく発電機励磁制御による電力系統安定化理論の開発

研究課題名（英文）Improvement of Power System Stability by Excitation Control of Synchronous Generators Using Wide Area Measurement Systems

研究代表者

河辺 賢一 (Kenichi, Kawabe)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60634061

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：送電線への雷撃などの擾乱発生時に、電力系統内の同期発電機群が同期外れを起こすことなく同期状態に回復しうる能力の程度を過渡安定性と呼ぶ。本研究では過渡安定性の向上を目的として、同期発電機の新たな励磁制御システムの構想および核となる理論を開発した。提案システムでは、系統内の発電機群の回転子角速度を広域で収集し、この広域情報を新たに提案した制御理論で用いることによって、系統事故後の励磁電圧を変化させる。数値シミュレーションの結果、発電機の自端情報のみを用いた従来の励磁制御システムでは安定化効果が得られない事故に対しても、効果的に発電機の動揺を抑制できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発電機の励磁制御に広域計測データの利用を想定することで、従来の励磁制御システムでは必須であった制御システムの事前チューニングを必要とせず、再生可能エネルギーの出力予測外れなどに起因する想定外の運用状態に対しても高い系統安定化効果を発揮することができる電力系統安定化制御システムを開発した。

さらに、制御システム実現のために必要となる計測データの種類、時間解像度や、通信速度等を明らかにした。このことは、それぞれの分野における一つの技術開発目標となり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have proposed a novel excitation control method for synchronous generators (SGs) for improvement of transient stability in power systems. The proposed excitation system controls the excitation voltage based on a wide-area measurement system (WAMS). Numerical simulations were carried out for multi-machine power systems. The results show that the proposed WAMS-based stabilizer (WBS) improves the first swing stability and enhances the damping of the subsequent oscillation, whereas the conventional power system stabilizer (PSS) does not necessarily improve the first swing stability. It is also noteworthy that the WBS has few parameters that need to be tuned, unlike the PSS.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力系統 過渡安定性 同期発電機 広域計測システム 励磁制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

送電線への雷撃などの擾乱発生時に、電力系統内の同期発電機群が同期外れ(脱調現象)を起こすことなく再び同期状態に回復しうる能力のことを過渡安定性と呼ぶ。わが国の電力事業では、同期発電機の脱調現象に伴う大停電を防ぐために、これまで系統保護リレーシステムや発電機励磁制御システム 無効電力補償装置など 様々な系統安定化技術が開発・実用化されてきた。

既存の系統安定化技術は、電力系統の運用状態を事前に予測し、想定した運用・事故条件に対して予め制御動作の決定や制御定数のチューニングを行うものが殆どである。しかし、今後の電力系統では出力予測が難しい再生可能エネルギー電源 (RES) が大量連系されることで、時間的余裕をもった運用計画を立てることが難しくなり、さらに系統事故時における一部の RES の想定外の運転停止が過渡安定性を著しく損なう可能性があることが明らかになっている。そのため、想定外の運用状態で系統事故に直面した場合、既存の安定化技術だけでは電力系統の安定運転を維持できない恐れがあり、将来の安定的な電力供給のためには、新技術を適用した系統安定化技術の開発が必要である。

近年、電力系統の監視・制御技術の高度化に向けて、GPS (Global Positioning System) による時刻同期機能をもつ位相計測装置 PMU (Phasor Measurement Unit) を利用した WAMS (Wide Area Measurement System) の技術開発が国内外で研究されている。申請者はこれまで、将来の電力系統にも適用可能な系統安定化技術として、リアルタイムの広域計測データによるパワーエレクトロニクス応用機器の利用を提案してきた。先行研究では、リアルタイムの広域計測データを利用した新しい系統安定化理論を開発し、この理論によって送電系統に設置されたパワーエレクトロニクス応用機器を事故時に緊急制御することで、想定外の事象に対しても過渡安定性の向上に高い効果を発揮することを確認している。ここで開発した系統安定化理論は、二次電池以外の電力制御機器にも応用できる可能性があり、その適用先の一つとして発電機の励磁制御システムを考えている (図 1)。

従来の励磁制御システムでは、自端情報を利用した自動電圧調整装置 AVR (Automatic voltage regulator) や電力系統安定化装置 PSS (power system stabilizer) が適用されてきたが、広域計測データを利用した新たな理論により励磁制御を行うことで、想定外の事象にも対応可能なシステムが構築できる可能性が高い。

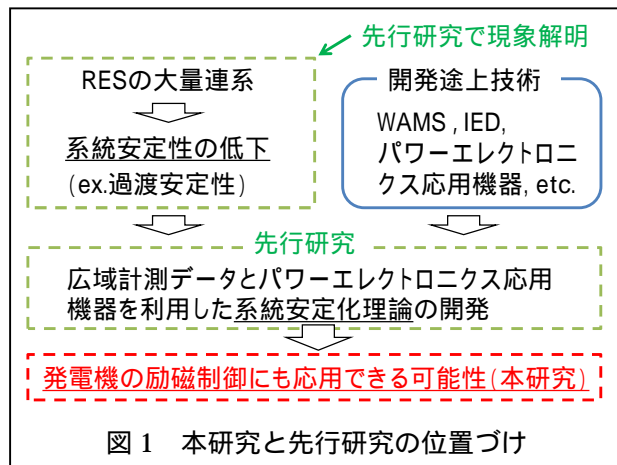


図 1 本研究と先行研究の位置づけ

2. 研究の目的

先行研究で開発した系統安定化理論をベースとして、過渡安定性の安定化に寄与する発電機の励磁制御システムの理論構築を目的とする。

3. 研究の方法

計算機シミュレーションを主体として以下の研究項目に取り組んだ。

- (1) 広域計測データを利用した励磁制御システムの基礎理論開発
- (2) 広域計測データ利用時のデータ遅延・欠損対策の開発
- (3) 既存の励磁制御システムとの比較、協調手法の開発

4. 研究成果

研究の方法で述べた3つの研究項目に対して、以下の研究成果を得た。

(1) 広域計測データを利用した励磁制御システムの基礎理論開発

将来の電力システムにも適用可能な系統安定化技術として、リアルタイムの広域計測データを利用した発電機励磁制御理論を新たに開発した。提案理論は、図2に示すように、出力感度の算出部とエネルギー関数の減衰を促す制御動作の決定部で構成される。

出力感度とは、ある発電機の励磁電流の変化による同じ電力システムに連系されたそれぞれの発電機の出力変化を呼ぶ。本研究では、広域計測データ(発電機の内部誘起電圧の大きさ・位相角)と送電系統のインピーダンスによる計算理論を提案した。提案理論では、同期発電機の数式モデルから、励磁電流の変化が内部誘起電圧の時間微分を変化させることを明らかにし、この関係から出力感度を計算する。

エネルギー関数は、電力システムの全ての発電機がもつ動揺エネルギーを表す抽象的な概念である。本研究では、エネルギー関数の早期減衰を促し、過渡安定性の安定化するための制御理論を提案した。提案理論では、励磁電流の変化がエネルギー関数の二階微分の値を変化させるという関係式を導出し、この関係と前述の理論で計算した出力感度を利用することで、事故後のエネルギー関数の減衰を促す励磁電流の制御理論を構築した。

提案理論をAVRの補助信号とした励磁制御システム(提案システム)について、国内外で開発されている複数の電力システムの標準モデルをつかった計算機シミュレーションを行い、広域計測データにもとづく励磁制御による過渡安定性の安定化効果について調べた。その結果、提案法に関する以下の特徴を明らかにした。

- 提案システムは、発電機相差角の事故後の第一波動揺の抑制および第二波以降の動揺抑制に対して有効である。特に、第一波動揺の抑制効果は、AVRとPSSの組合せによる従来の励磁制御システムよりも高い。
- 提案システムは、同期発電機が事故点からの電氣的距離が遠い場合であっても、他の発電機の状態をみながら励磁電圧を変化させ、過渡安定性の安定化に寄与する。

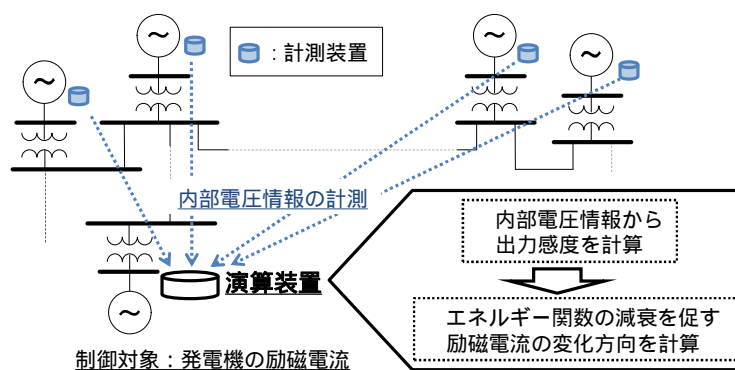


図2 広域計測データを利用した励磁制御システムの概念図

(2) 広域計測データ利用時のデータ遅延・欠損対策の開発

提案理論は広域計測データを基に制御動作を決定するため、データの計測・通信・演算にかかる遅れを無視できない。そこで、広域計測データに係る遅れが過渡安定性に与える影響について調べ、遅れが長くなるほど、提案システムの効果が低減することを確認した。その対策として、広域計測データの推定及び制御演算の簡略化を可能にする手法を開発した。

本検討では、ある発電機の励磁電圧の変化は当該発電機以外の出力には大きな変化を与えない(感度が小さい)ことを利用し、前項で開発した提案理論を簡略化し、発電機の回転子角速度だけを入力信号とする制御理論を構築した。さらに、広域計測データである回転子角速度の収集に係る遅れを緩和するために、回転子角速度に関する直前の計測データに Newton 補間公式を適用し、現在の値を推定する手法を提案した(これを推定器とよぶ)。

提案した推定器の有効性を電気学会の標準モデルを用いた計算機シミュレーションによって確認した。その結果、自端の感度係数が他の発電機に対して十分大きいという条件の下で、角速度の推定器を用いて制御することにより、情報遅延によるダンピングの悪化を緩和できることを明らかにした。

(3) 既存の励磁制御システムとの比較、協調手法の開発

想定外の系統条件に対する既存システムと提案システムの安定化効果を、電気学会の標準モデルを用いた計算機シミュレーションによって比較した。その結果、既存システムの事前チューニングの際に想定した系統条件と異なる系統条件とした場合、既存システムでは安定化効果が得られないような系統条件に対して、提案システムでは事前チューニングを行うことなく有効に機能することを明らかにした。

また、既存システムと提案理論を協調した発電機の励磁制御手法を提案し、電気学会の標準モデルを用いたシミュレーションによってその有効性を確認した。本手法では、PSS の制御系パラメータのチューニングは必要となる一方で、リアルタイムの広域情報通信を必要とすることなく、既存の PSS よりも高い安定化効果が得られることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Masuda, K. Kawabe, and T. Nanahara	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 An Excitation System of Synchronous Generators Based on Wide Area Measurement System for Transient Stability Improvement in Power Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Int ' I Council on Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K.Kawabe, M. Masuda, T.Nanahara
2. 発表標題 Excitation Control Method Based on Wide-Area Measurement System for Improvement of Transient Stability in Power Systems
3. 学会等名 21st Power Systems Computation Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Masuda, K.Kawabe, T.Nanahara
2. 発表標題 An Excitation System of Synchronous Generators Based on WAMS and Energy Function for Improvement of Transient Stability
3. 学会等名 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Masuda, K.Kawabe, T.Nanahara
2. 発表標題 An Excitation System of Synchronous Generators Based on Wide Area Measurement System for Transient Stability Improvement in Power Systems
3. 学会等名 Int ' I Conference on Electrical Engineering（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本燎弥, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 電力系統の過渡安定性向上のための中央事前演算に基づく発電機励磁制御手法
3. 学会等名 令和元年度電気学会電力系統技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 電力系統の過渡安定性向上を目的とした広域リアルタイム情報に基づく発電機励磁制御手法の検討 推定器による情報遅延の影響の緩和
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 過渡安定性向上のための広域計測情報を用いた発電機励磁制御手法 - 潮流状態の変化に対するロバスト性の検証 -
3. 学会等名 平成30年度電気学会電力技術・電力系統技術合研
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 広域計測情報に基づく発電機励磁制御による電力系統の過渡安定性の安定化
3. 学会等名 平成30年電気学会B部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 電力系統の過渡安定性向上を目的とした広域リアルタイム情報に基づく発電機励磁制御手法の検討 AVRとの併用による改善
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 過渡安定性向上のためのエネルギー関数に基づく発電機励磁制御手法の検討
3. 学会等名 平成29年電気学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 過渡安定性向上のための広域情報に基づく発電機励磁電圧制御手法の検討ーWest10機系統への適用ー
3. 学会等名 電気学会平成29年電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 増田宗紀, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 電力系統の過渡安定性向上を目的とした広域リアルタイム情報に基づく発電機励磁制御手法の検討ーAVRとの併用による改善ー
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018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
研究協力者	増田 宗紀 (Masuda Muneki)		
研究協力者	山本 燎弥 (Yamamoto Ryoya)		