

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420882

研究課題名(和文) 地域独立系統と大規模電力系統の連系システム安定化制御の研究

研究課題名(英文) Power stabilization control in large-scale power generation system linked with small-scale local power generation system

研究代表者

奥野 光 (OKUNO, Hikaru)

筑波大学・システム情報系・研究員

研究者番号：10160813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能型や分散型の電源、また小規模独立型系統は、資源枯渇や温暖化対策として普及が進む一方、連系した電力系統の不安定性を増大させるため、複雑系制御法のOGY法や遅延フィードバック法制御部を持つ系統模擬実験装置を構築し、その有効性を検討した。また、連系用の色素増感太陽電池の作製を試みた。仮想同期発電機制御法を改良して、擾乱除去特性の優れたMKD制御法を考案し、遅延フィードバック制御法の小容量電力系統における有利性を明らかにした。得られた14件の研究成果を、電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集および平成28年電気学会全国大会講演論文集に投稿し、口頭発表を行った。

研究成果の概要(英文)：Owing to global warming and depletion of natural resources, major focus has been laid on renewable energy, distributed power generation, and small-scale local power generation systems. However, large-scale power generation systems are lead to instability by linked with those. Therefore, we have invented a complex control method, constructed a test system for simulation, and linked it with dye-sensitized solar cells and other independent systems. The MKD control developed along with the virtual synchronous generator (VSG) control demonstrated a superior readiness for the quick compensation of a disturbance. The 14 research results were reported at the Institute of Electrical Engineers of Japan.

研究分野：電磁エネルギーシステム工学

キーワード：エネルギーシステム 安定化制御 電力系統 複雑系制御 色素増感型太陽電池 クローズドグリッド

1. 研究開始当初の背景

エネルギーシステムの中で、人類が構築した最大の複雑システムと目される電力系統は、現代社会の維持と発展のため、高品質な電力を安定に供給することが使命とされている。この目的を達成するため、系統の定態安定度や過渡安定度対策として、送電電圧の高電圧化、速応励磁、系統安定化装置 (PSS)、高速調速機、静止形無効電力補償装置 (SVC)、高速遮断・再閉路などさまざまな方法が実用化されている。また、超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) と系統との間でのエネルギー高速授受により動揺を吸収する方法も研究されている。

しかし、2003年に起きた北米の事故では、送電線の樹木接触から、送電線の停止、系統監視制御システムの故障による負荷遮断の遅れ、N-1基準からの逸脱、潮流の回りこみによる送電ルートの崩壊が起きて、さらに広範囲へ波及し大停電に至ったことが報告されている。最近ではこのような大規模な停電事故が、世界各地で数年に一度は起きるようになってきている。

また今後は、化石燃料資源枯渇問題、地球温暖化などの環境問題から、太陽電池、風力発電等の再生可能エネルギーの利用が増加する趨勢にあり、喫緊の課題となっている。それらや燃料電池といった分散型電源の系統連系により、ますます電力系統の不安定性の増大が予想される。さらに電力需要増加により系統の運用状況がいつそう厳しさを増し、運用点の相差角増大による不安定性の増大も懸念されている。そこで、不安定な再生可能エネルギー等を安定に利用できるシステムとその新しい制御法を検討することが重要課題になると考えられる。

近年、巨大複雑システムを扱う分野の発展を受け、電力系統を複雑システムとして捉え、その成果を応用して電力系統の不安定性を解析する研究が国内外で行われるよ

うになってきた。またそれらの研究を裏づけるように、Doyleらは、北米における1984年から10年間ほどの大停電事故の頻度と規模の相関曲線を調べ、複雑・カオス系の特徴と同じ指数型になることを報告している。

申請者は、上記のような観点から、複雑系制御法の研究者Ott等により提案されたOGY法を電力系統の安定化に応用する研究を10年以上に亘って検討してきた。この制御法は、従来の制御法のような内部安定性を持たせる視点と異なり、状態点を不安定なカオス状態の時に現れる不安定平衡点に収束させる方法である。不安定平衡点そのものではなく、その安定多様体を制御目標とするため、システムが可制御でない場合でも、可安定でさえあれば状態フィードバックにより安定化できることを特徴とする適用条件の広い手法と考えられる。

今までに計算機シミュレーションによる研究により、三機無限大母線系統において不規則なカオス状態に陥った発電機の相差角を、OGY法により安定化できることを明らかにした。しかし、OGY法は動的状態での不安定平衡点のよい探索法が見つかっていないこと、状態点が不安定平衡点の近傍まで近づくのを待つため速応性に問題があること、離散時間型の制御法であるためノイズに弱いこと等が欠点である。そこで、次にこれらの問題点を回避できる制御法として、Pyragasによって提案されたカオス系の遅延フィードバック制御法 (DFC法) の適用を検討した。

この方法の要点は、任意の時刻のシステムの出力信号に対し、その少し前の時刻の出力信号との差が零になるようにフィードバックを施すと、不安定平衡点、あるいは出力信号の時間差を周期とする不安定周期軌道を安定化できるというものである。これまでの研究で、計算機シミュレーション

により、二回線送電時の三機および五機無限大母線系統に、一回線短絡事故が起きた場合の遅延フィードバック制御を検討した。超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) と系統間でエネルギーの授受を行わせ、不規則に変動する発電機の相差角を、安定な状態に制御できることを報告している。最近では、改良DFC法 (EDFC)、Half-Period-DFC法の検討、Half-Period-EDFC法の提案を行っている。また、予備実験として、小型のサーボモータと同期発電機3台によるマイクロ電力系統を構築し、相差角の不安定挙動を調べたり、色素増感太陽電池を作成し、効率改善の研究を行っている。さらに、EMTP等の解析プログラムにより、地域独立系統の瞬停時における解析と制御のシミュレーションを行っている。

2. 研究の目的

近年、資源枯渇と地球温暖化により、再生可能型や分散型電源の研究が進み、また小規模地域独立型系統が検討されている。一方、大規模電力系統は、定態安定度限界内で、かつ事故等による過渡安定度を確保するため相差角 20~30 度以内で運転されるが、需要増加による運用点相差角の増大により不安定性増大が強く懸念される。さらに災害対策や経済性を考慮すると、再生可能型、分散型はもとより、地域独立型系統といえども大規模系統との連系が指向され、大規模複雑な系統の安定化が重要となると考えられる。そこで本研究は、考案した複雑系制御法と色素増感太陽電池、超電導磁気エネルギー貯蔵装置、独立系統を連系した系統模擬実験システムを構築し、安定化制御を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的である、安定な大規模複雑エネルギーシステムを構築するため、色素増感太陽電池モジュールと超電導磁気エネ

ルギー貯蔵装置、地域独立模擬系統をはじめ、複雑系で提案された方法を応用発展させたコントローラからなる実験装置の作製、実験、評価を以下の手順で行う。また本研究は、研究代表者が研究全般にわたって行うが、研究代表者の研究室に所属する卒業研究生、大学院生も研究協力者として適宜、計算機運用、実験測定、データ解析において協力するものである。

(1) 平成26年度

三機無限大母線系統における OGY 法および遅延フィードバック制御法実験装置を構築し、実験によりその有効性を実証するため、最初に s-Box kit をベースにして OGY 法および遅延フィードバック制御法における制御則を実現するコントローラの具体的な設計と作製を行う。次年度の実験結果をフィードバックさせてシステム設計を変更、拡張しやすくするために、パラメータの設定、データ表示等は、計算機の GUI 上で行えるようなシステムを構築する。

すでに連続系の動揺方程式を離散化した式から、OGY 法における制御入力式を求めてシミュレーションを行っているので、これを実現するアルゴリズムを構築し、計算機コードを開発する。また、遅延フィードバック制御法における遅延時間素子と増幅素子の設計と作製、計算機コード開発を行う。次年度行う予定の実験結果を設計にフィードバックさせ変更を容易にするため、遅延時間と増幅率は計算機の GUI 上で設定できるシステムを構築する。得られた研究成果を逐次、学会講演会、研究会等で発表する。

(2) 平成27年度

系統の状態を計算機に取り込むための AD ボード関連部を作製する。また、現有的超電導磁気エネルギー貯蔵装置について、交直変換部に上記の制御入力を印加するための DA ボード関連部を作製する。

色素増感太陽電池セルを組み合わせたモジュールと交直変換部を作製する。予備実験で作製した電力系統を拡張し、コントローラ、色素増感太陽電池モジュールと超電導磁気エネルギー貯蔵装置、地域独立系統を組み合わせて、系統の制御実験を実施する。

系統に色素増感太陽電池モジュールからの不規則で不安定な電力を印加する方法により、また負荷側で短絡事故等を起こす方法により、相差角の動揺を発生させる。相差角の時系列データから、OGY 法および遅延フィードバック法の制御入力時系列を演算する。それによる指令データで、系統と超電導磁気エネルギー貯蔵装置との電力授受をさせることにより、系統の相差角の不規則な変動を安定化できるか調べる。得られた研究成果を逐次、学会講演会、研究会等で発表する。

(3) 平成28年度

引き続き、制御実験を継続する。制御結果を解析し、OGY 法においては離散時間の変更、アルゴリズムの改良を繰り返して制御特性を向上させる。遅延フィードバック法においては、遅延時間や増幅度に対する依存性を測定し、最適な制御パラメータを求める。AD ボード、DA ボード、交直変換部の特性を改善し、制御性能の向上を検討する。

色素増感太陽電池モジュールからの不規則な電力印加と電力系統の相差角の不安定挙動との相関をさらに詳細に調べる。昨年度の制御結果と比較検討を行い、OGY 法における離散時間の最適値、アルゴリズムの最適化を試みる。遅延フィードバック法においては、遅延時間や増幅度に対する、最適な制御パラメータ値を絞り込む。

最後に、不規則・不安定な色素増感太陽電池モジュールと連系された電力系統に対して、OGY 法および遅延フィードバック

制御とその改良法を用いて超電導磁気エネルギー貯蔵装置、地域独立系統との電力授受を行わせることにより、安定化された結果と有効性を解析評価し、総合的にまとめて、国際会議等で発表して広く専門的な評価を仰ぐ。

4. 研究成果

(1) 平成26年度

OGY 法および遅延フィードバック法による制御部を持つ、三機無限大母線系統からなる実験装置を構築した。実験によりその有効性を実証するため、s-Box kit をベースにしてOGY 法および遅延フィードバック制御法を実現するコントローラ的设计と作製を行った。発電機の慣性定数、定格容量が共に小さい特性を持つ独立系統に対して、遅延フィードバック制御法の有効性を検討した。また、遅延フィードバック制御法とPID制御法の組み合わせを検討した。系統事故の発電機相差角の擾乱最大値は、通常は母線地絡事故を想定して計算されるが、二回線時間差地絡事故を想定しシミュレーションを行った結果、より過酷であることが分かった。現状よりロバストで信頼性の高い制御法の電力系統を作製する上で、新しい最大過酷事故評価指標に出来る可能性が見出された。次年度に系統に組み込む準備のため、変換効率の良い色素増感太陽電池の作製を試みた。得られた6件の研究成果を、電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集に投稿し、口頭発表を行った。

(2) 平成27年度

三機無限大母線系統からなる実験装置において、系統の状態を計算機に取り込むためのAD ボード関連部と、制御入力を印加するためのDA ボード関連部を作製した。また、色素増感太陽電池の変換効率と耐久性を向上させるため、二種類の色素を用いた多層光電極型セルの作製と、多種カチオ

ンによるゲル電解質型セルの開発を行った。地域独立クローズドグリッドの過渡安定度を高めるため、仮想同期発電機制御法を改良したMKD制御法を考案し、擾乱除去特性が優れている事を明らかにした。クローズドグリッドにおいて、従来のPID制御法と遅延フィードバック法を比較検討し、慣性定数の大きい発電機にはPID制御が、小さい発電機には遅延フィードバック法が有効であることから、小容量電力系統における遅延フィードバック制御法の有利性を明らかにした。得られた8件の研究成果を、電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集、および平成28年電気学会全国大会講演論文集に投稿し、口頭発表を行った。

(3) 平成28年度

OGY法においては離散時間の変更、アルゴリズムの改良を繰り返して制御特性の改善を行った。遅延フィードバック法においては、遅延時間や増幅度に対する依存性を測定し、小容量電力系統における最適な制御パラメータを探索した。色素増感太陽電池は、波長感度特性から散乱光も有効に利用できる利点があるため、クローズドグリッドにおける分散型電源に適している。そのモジュールからの不規則な電力印加とクローズドグリッドの相差角の不安定挙動との相関を調べた。また、仮想同期発電機制御法を改良したMKD制御法を用いて、クローズドグリッドにおける擾乱除去特性の改善を行った。本研究において開発してきた上記の複雑系制御法は、クローズドグリッドのような小容量で安定性に問題のある系統を含めて有効であることを示すことが出来た。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計14件)

- (1) 飯山 暁、奥野 光、クローズドグリッドにおける電力安定化制御、平成28年電気学会全国大会、2016年03月16日～2016年03月18日、東北大学(宮城県仙台

台市)

- (2) 澤岷 秀治、奥野 光、分散型電源が接続された独立小容量系統の挙動解析および制御評価、平成28年電気学会全国大会、2016年03月16日～2016年03月18日、東北大学(宮城県仙台市)
- (3) 松本 雄志、奥野 光、多種カチオンによるゲル電解質型色素増感太陽電池の高性能化、平成28年電気学会全国大会、2016年03月16日～2016年03月18日、東北大学(宮城県仙台市)
- (4) 荒金 大地、奥野 光、異なる色素を用いたTiO₂層を持つ多層型色素増感太陽電池の製作、平成28年電気学会全国大会、2016年03月16日～2016年03月18日、東北大学(宮城県仙台市)
- (5) 飯山 暁、奥野 光、クローズドグリッドにおける電力安定化制御、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2015年11月28日～2015年11月28日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (6) 澤岷 秀治、奥野 光、分散型電源が接続された電力系統の挙動解析、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2015年11月28日～2015年11月28日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (7) 松本 雄志、奥野 光、多種カチオン組み合わせ使用による色素増感太陽電池におけるゲル状電解液の高性能化、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2015年11月28日～2015年11月28日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (8) 荒金 大地、奥野 光、異なる色素を用いたTiO₂層を持つ多層型色素増感太陽電池の製作、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2015年11月28日～2015年11月28日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (9) 奥嶋 良太、奥野 光、独立した電力系統における系統安定度解析とカオス制御の有効性の検証、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014年11月22日～2014年11月22日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (10) 澤岷 秀治、奥野 光、三機無限大母線系統に対するDFCおよびPID制御の切り替え制御の評価、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014年11月22日～2014年11月22日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (11) 飯山 暁、奥野 光、二回線送電における二回線時間差地絡事故についての考察、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014年11月22日～2014年11月22日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (12) 木村 駿介、奥野 光、CoZrMo/SiO₂多層磁性薄膜を搭載したDC-DCコンバータの損失測定、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014年11月22日～2014

年 11 月 22 日、日立シビックセンター(茨城県日立市)

- (13) 松本 雄志、奥野 光、色素増感太陽電池における電解液レドックス対と増感色素の物質比が与える影響の考察、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014 年 11 月 22 日～2014 年 11 月 22 日、日立シビックセンター(茨城県日立市)
- (14) 荒金 大地、奥野 光、変換効率向上のための色素増感太陽電池の評価と解析、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014 年 11 月 22 日～2014 年 11 月 22 日、日立シビックセンター(茨城県日立市)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

奥野 光 (OKUNO , Hikaru)

筑波大学・システム情報系・研究員

研究者番号 : 10160813