

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420271

研究課題名(和文) グリッド連系を含む電力変換システムの高速アクティブ安定化制御法

研究課題名(英文) Fast Active Stabilization Method of Grid-Connected Power Conversion System

研究代表者

加藤 利次 (Kato, Toshiji)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：40148375

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、グリッド連系電力変換システムに関して、フィルタの共振抑制制御法、システム安定化法の高速・広域化法、高速・高効率なシミュレーション法の3点の開発を行うことを目的とした。共振の抑制には、仮想抵抗によるアクティブダンブ法を開発した。システム安定化法としてリアプノフ関数による方法を開発し、アクティブダンブ法と組み合わせた高速・広域に安定化制御法を考案し、その有用性を理論的・実験的に確認を行った。さらに回路分割法に基づく高速・高効率なシミュレーション法を考案し、さらにその適用可能性を向上させた。以上より、安定かつ振動抑制可能なグリッド連系システムの制御・設計法を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：This study developed three methods for grid-connected power conversion systems; filter-resonance damping control, fast and wide system stabilization, and efficient simulation methods. An active damping control based on virtual resistors is developed to suppress filter resonances. An energy-based control method based on the Lyapunov function is developed to stabilize the system fast and widely. A new stabilized control method which can suppress the resonance is developed with combination of the above two control methods, and it is validated theoretically and experimentally. A fast and efficient simulation method based on the circuit-partitioning technique is developed and modified for applications including digital control programs. The three developed methods are useful to develop stable grid systems without filter resonances.

研究分野：工学

キーワード：アクティブダンブ制御 仮想抵抗 安定性解析 リアプノフ関数 正弦波補償器 デジタル制御 高速シミュレーション 回路分割法

## 1. 研究開始当初の背景

再生可能なエネルギーシステムを電力系統に接続して、その発電エネルギーの効果的な活用を目指すグリッドシステムの重要性が増してきている。特に太陽光・風力発電システムを系統に連系するためには、いかにインバータやコンバータを制御して系統と安定的に連系するかが議論されている。したがって系統内にこれら複数の電力変換器が接続され、これら相互作用の影響による誤動作やフィルタによる共振現象が意識され始めてきており、これらの現象解明やさらにその悪影響の低減対策が社会的に重要な課題となってきた。

これらの内容は国内では電気学会の産業応用部門や電力・エネルギー部門において議論され、海外においては米国電気電子学会(IEEE)の ECCE(Energy Conversion Congress and Exposition)やヨーロッパでは EPE(European Conference on Power Electronics and Drives)等で各種方法が今まさに議論されつつある。例えば、これらシステムは接続部にフィルタを要し、それに伴って生じる振動が問題視されている。他にもインバータによる連系システムでは、出力に LCL フィルタが用いられるが、これによる振動対策が議論されている。(例えば S. G. Parker, B. P. McGrath, D. G. Holmes: "Regions of active damping control for LCL filters," IEEE ECCE 2012, pp.53-60.) このような課題に対応するには、制御系を一般的にとらえた設計法により、系統的に設計する必要がある。また複数の電力変換器が連系しているシステムではその相互作用を考慮したシステム全体の安定性の確保が課題となる。しかし安定のための変換器単独での条件、しかも十分条件は Middlebrook 条件により示されているが、連系した場合の条件、さらにそれらを安定化する制御法はいまだ開発途上の段階である。本研究はこのような安定化制御系の設計に寄与しようとするものである。

またこのような背景と並行して、これらの解析のためのモデリングおよびシミュレーション技術に関しても国内外において検討されつつある。特に電気学会内の産業応用部門半導体電力変換技術委員会において「パワーエレクトロニクスシミュレーションのための標準モデル開発協同研究委員会」(平成 24 年 8 月～26 年 7 月)においてスマートグリッドを含む PE システムのモデリングを中心としたシミュレーション手法が調査研究されてきている。また海外においても例えば米国電気電子学会の Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) において様々な手法が報告されている。そのため、上記安定化設計手法を支える高速・高効率なモデリングやシミュレーション手法の開発も重要である。

このような背景のもとグリッド連系を

含む電力変換システムの高速度アクティブ安定化制御法は時宜を得ており、現在まさに望まれる技術的課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、グリッド連系を含む電力変換システムにおいて、フィルタ等の共振現象を高速度アクティブ制御により抑制し、かつ連系システム間の相互作用を抑えてシステム全体を安定に制御する方法の開発を目的とする。そのため本研究は、(1) グリッド連系インバータシステムのアクティブ振動抑制制御法の開発、(2) システム安定化法の高速度・広域化、およびそれら設計手法を支える(3) 電力変換システムのシミュレーションの高速度・高効率化の3つ目的をもった各過程より構成された。

### (1) グリッド連系電力変換システムのアクティブ制御法の開発

グリッド連系インバータシステムの出力には一般的に LCL フィルタが接続され、これを介して系統と連系されている。そのためインバータ出力にフィルタの共振周波数の高調波成分があると大きく振動して出力波形が乱れる現象が現在問題視されている。この共振現象は抵抗を挿入してダンピングすることにより抑制することもできるが、この場合には損失が問題となる。そのため損失の生じないアクティブなダンピング法の開発を目的とした。

### (2) 高速・広域化したシステム安定化法の開発

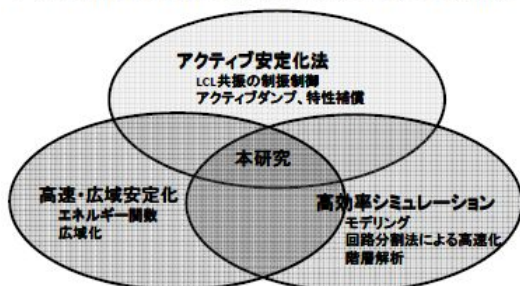
連系された制御系の安定化の範囲は現在のところ、個々変換器の十分条件の組み合わせで設計されていて、かなり保守的に構成される。そのためこの安定な範囲を広げ、しかも高速に制御する方法の開発を行う。従来、安定解析には、Middlebrook の条件が用いられ、これは十分条件ではあるが、単独な変換器による系では有用であった。しかしグリッド連系システムでは相互作用を考慮する必要があり、さらにより広域で安定性を確保する必要がある。そのためリアプノフ関数等のエネルギー概念を用いて、フィルタや電力変換器内の蓄積エネルギーを受動的に制御することにより、広域かつ高速度な安定化を可能とする方法の開発を目的とした。

### (3) 電力変換システムの高速度・高効率化シミュレーション手法の開発

上記(1)(2)の目的を達するためには、それらの原理に基づいて設計された複数の変換器を伴う系統連系システムに関して、高速・高効率なモデリングやシミュレーションにより、設計や動作検証をしていく必要が生じる。しかしながら連系する変換器の数を増やしていくと計算時間が急激に増大する欠点があった。そのため回路分割法等の適用によ

り、節約可能な計算はできるだけ節約して、高速・高効率な回路シミュレーションする方の開発をも目的とした。

グリッド連系を含む電力変換システムの高速アクティブ安定化法



以上により、本研究は上図に示したようにこれらの特色要素を融合させて、新しい系統連系システムの安定化法を開発しようとするものである。

### 3. 研究の方法

本研究は平成25年度より3年間にわたる計画により構成され、研究代表者を中心として、1人の研究分担者(井上馨:同志社大学理工学部)と9人の研究協力者(弘中亮太郎、秋山佑介、上田成彦、佐藤真太郎、小川拓海、石田政成:以上当時同志社大学理工学研究科学生、麻布昌志、大橋功基、高見悠基:同志社大学理工学研究科学生)とにより遂行された。本研究は、前述の目的を達するため以下の3つの開発過程にまとめられる。

#### (1) グリッド連系電力変換システムのアクティブ制御法の開発

現在論じられているLCL共振の制振制御法に関しては、すでに調査を行っていたが、さらに広範囲に調査し、これらのアクティブダンブ法の得失をまとめた。その上で制御系の構成を検討し、それら手法を一般化したアクティブ制御法の開発を行った。その制御ゲインの設計には最適制御法を用い、制御系設計ツール(matlab)を用いた設計プログラムの開発を行った。

設計システムの動作検証にはシミュレータによるシミュレーションと、DSPベースのデジタル制御システムによる実験的検証を組み合わせで行った。

#### (2) 高速・広域化したシステム安定化法の開発

グリッド連系システムの安定領域を広げつつ、また高速制御するため、リアプノフ関数を用いて、制御系の設計を行った。特に同法では、フィルタのインダクタやキャパシタンスに基準波形を求める必要があったが、それらを自動的に生成する方法を考案し、その制御ゲイン決定のためにmatlabによる設計プログラムの開発を行った。

設計システムの検証には、複数台のインバータを動作させて、それらの相互の影響について、シミュレーションとデジタル制御システムによる実験的検証を組み合わせで行った。

#### (3) 電力変換システムの高速・高効率化シミュレーション法の開発

設計した系統連系システムにおいて、複数のインバータの連系動作状態が検証可能なシミュレータの開発を行った。数値技法的には回路分割法の適用により、高速・高効率な回路シミュレーションを目指した。そのため6コアのパーソナルコンピュータを用いて、並列化シミュレーションを行った。さらに上記制御法の開発・検証を促進するため、デジタル制御システムのCコードプログラムとの連携を可能とするような方法の開発を行った。

### 4. 研究成果

本研究は以上の方法により、グリッド連系を含む電力変換システムにおいて、フィルタ等の共振現象を高速アクティブ抑制制御し、また連系システム間の相互作用を抑えて安定にシステム全体を制御する方法の開発をシミュレーションおよび実験的に検証を行った。

#### (1) グリッド連系電力変換システムのアクティブ制御法の開発

連系インバータのLCLフィルタの共振振動を抑制するアクティブダンブ制御法を開発することができた。まず制御系の構成に関して、フィルタの状態変数を部分的にフィードバックするよりも、補償器も含めた全変数をフィードバックして制御すればより制振効果が高いことが確認できた。しかも全状態フィードバックによる制御系で構成すると最適制御法や極配置等の手法により一般的な設計法が成り立つため、この点においても有用である。さらにダンブ抵抗成分をLCL各素子に仮想的な挿入して、よりダンブ特性を向上させる方法も開発した。基本的にフィルタとインバータとの間に1個のダンブ抵抗成分を挿入して最適制御法で制御ゲインを設計すれば、十分にダンブ効果があることが分かった。これらはシミュレーションおよびデジタル制御システムによる実験により明らかにすることができた。

#### (2) 高速・広域化したシステム安定化法の開発

グリッド連系システムの安定領域を広げつつ、また高速制御するため、エネルギー関数に基づく制御として、リアプノフ関数を基にした制御法の開発を行った。従来はアナログ形のものであったがデジタル形の原理を考案し、さらに(1)で考案したアクティブダンブを組み合わせた制御ゲインの設計法を開発し

た。同法では、フィルタのインダクタやキャパシタンスに基準波形を求める必要があったが、それらを自動的に生成する方法を考案した。またインバータの内部抵抗等による想定外のパラメータの誤差が存在する場合にはパラメータをチューニングして補正を行った。

同制御によるインバータがいかに安定性を確保しているかに関して、その原理についてインピーダンス法により追求を行った。その結果、出力インピーダンスの位相の変化が緩やかで $\pm 90^\circ$ 以内に収まっていて、フィルタ共振特性のアクティブダンピングを行っても、周波数特性の抵抗成分が正となる意味で、受動的にできることが判明した。一方、システムのラインインピーダンスは、純誘導的であるならば $90^\circ$ であり、一般的に受動的であるため $\pm 90^\circ$ 以内である。そのため、両者の位相差が $180^\circ$ となることはないために、安定性が確保できることが分かった。

さらに本研究では、リアプノフ関数による制御等による安定性が確保できる受動的なインバータを系統に混在させて、系統の安定化効果についての検討を行った。そのために単独では不安定となる線形の状態フィードバック補償制御に基づくインバータにリアプノフ関数による制御のインバータを並列に接続して、系統の安定化が可能であることが分かった。さらにこれら2種類のインバータを混在させて、一般的な安定化法について導出することができた。制御法の混在化による安定性をシミュレーションおよび実験により、開発法による制御の有効性が確認できた。

### (3) 電力変換システムの高速・高効率化シミュレーション法の開発

本研究では系統連系システムの動作を効率良く解析するために、直列リンクインダクタや並列リンクキャパシタ等で回路分割するマルチレート解析によるシミュレーション法の開発を行った。この手法による原型となるプログラムをすでに開発していたが、それを発展させて並列化による高速処理の汎用化を行った。回路分割法の並列処理は、計算粒度が細かいために、データ転送の不要な共有メモリ形の計算機システムが適している。そのため並列計算法として、OpenMPを用いて、スレッドを複数並列に立ち上げて、各スレッドに部分回路毎の計算を割り当て、各々の回路毎の動作レート適した可変時間刻みで同期させるようにアルゴリズムを考案した。この際、計算効率を上げるためには、可変刻み幅にレベルを設定して、各部分回路の計算時点を同期させる方法が有用であった。また汎用化のための部分回路および分割素子の計算におけるメモリ処理法やプログラムの構成法を考案した。

さらに回路分割法による系統連系システムの並列化回路シミュレーションに関して、汎用化を進めるため、回路分割の自動化手法についても開発を行った。この方法は、単数

および複数の場合の並列キャパシタの検出、直列インダクタの検出、制御回路による再結合の3つのステップよりなり、これらのアルゴリズムを考案した。さらに上記制御法の開発・検証を促進するため、デジタル制御システムのCコードプログラムとの連携を可能とする方法の開発を行った。

開発した回路分割マルチレート解析法により系統連系システムをシミュレーションしたところ、計算精度を保った上で計算時間を大幅に短縮可能で、インバータの連系動作状態が検証に有用であることを確認できた。

本研究では、グリッド連系を含む電力変換システムにおいて、システム安定化法としてリアプノフ関数による方法を開発し、アクティブダンピング法と組み合わせた高速・広域に安定化制御法を考案し、その有用性を理論的・実験的に確認を行った。さらに回路分割法に基づく高速・高効率なシミュレーション法を考案し、さらにその適用可能性を向上させた。以上より、安定かつ振動抑制可能なグリッド連系システムの制御・設計法を開発することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文](計3件)

加藤利次, 井上 馨, 小川 拓海, 高見 悠基: 「パワーエレクトロニクスシステムの並列化シミュレーションにおける自動回路分割法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No.10, pp. 1025-1032, (2015), 査読有  
DOI:10.1541/ieejias.135.1025

T. Kato, K. Inoue, M. Ueda: "Lyapunov-Based Digital Control of a Grid-Connected Inverter with an LCL Filter," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics," Vol.2, No.4, pp.942-948, (2014), 査読有  
DOI:10.1109/JESTPE.2014.2322613

加藤 利次, 井上 馨, 小谷由紀子: 「回路分割によるパワーエレクトロニクスシステムの回路シミュレーションの汎用化並列処理法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No.1, pp.1-9, (2014), 査読有  
DOI: 10.1541/ieejias.134.1

[学会発表](計23件)

高見悠基: 「電力変換器の解析的周波数特性の汎用的計算法」, 平成 27 年電気学会全国大会, 2016 年 3 月 16 日, 東北大学(仙台市・宮城県)

麻布昌志, 加藤利次, 井上馨: 「空間ベクトル法による 5 レベルインバータの直流入力電圧のバランス法」, 平成 27 年電気学会全国大会, 2016 年 3 月 16 日, 東北大学(仙台市・宮城県)

石田政成: 「系統連系インバータシステ

ムの制御方式の混在化による安定化法」, 電気学会半導体電力変換技術研究会, 2016年1月23日, 立命館大学(草津市・滋賀県)

高見悠基, : 「回路分割法によるパワーエレクトロニクス回路の制御プログラムを含む並列化シミュレーション」, 平成26年電気関係学会関西連合大会, 2015年11月14日, 摂南大学(寝屋川市・大阪府)

石田政成: 「系統連系インバータのリアプノフ関数に基づくデジタル制御-基準波形の補償法の検討-」, 平成26年電気関係学会関西連合大会, 2015年11月14日, 摂南大学(寝屋川市・大阪府)

T. Kato: "Stability analysis for grid-connected three-phase inverter with LCL filters," IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp.1 - 7, 2015年7月13日, バンクーバー(カナダ)

T. Kato: "Investigation of stabilities of Lyapunov-based digital control for grid-connected inverter," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp.2394 - 2399, 2015年9月22日, モントリオール(カナダ)

高見 悠基: 「回路分割法によるパワーエレクトロニクス回路の並列化シミュレーション」, パワーエレクトロニクス学会, 2015年6月14日, 同志社大学(京都府)

K. Ohashi: "Optimum and adjustable damping control of grid-connected inverter with an LCL filter," 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), pp.123 - 128, 2015年6月2日, ソウル(大韓民国)

麻布昌志: 「電力変換器のデジタル制御プログラムを含むシミュレーション法」, 平成27年電気学会全国大会, 2015年3月25日, 東京都市大学(東京都)

大橋功基: 「オブザーバを用いたLCLフィルタ付系統連系インバータの共振特性の抑制を含む制御法」, 平成27年電気学会全国大会, 2015年3月25日, 東京都市大学(東京都)

石田政成: 「系統連系インバータのリアプノフ関数に基づくデジタル制御のインピーダンス法による安定性の検討」, 平成27年電気学会全国大会, 2015年3月25日, 東京都市大学(東京都)

小川拓海: 「パワーエレクトロニクスシステムの並列化シミュレーションにおける自動回路分割法」, 電気学会半導体電力変換技術研究会, 2015年1月23日, 大阪工業大学(大阪市・大阪府)

秋山佑介: 「パラメータ誤差を考慮したLCLフィルタ付三相系統連系インバータの安定性解析」, 電気学会半導体電力変

換技術研究会, 2015年1月23日, 大阪工業大学(大阪市・大阪府)

秋在靖: 「スイッチング損失およびコンモード電圧を低減するマルチレベルインバータの空間ベクトル制御法」, 電気学会半導体電力変換技術研究会, 2015年1月23日, 大阪工業大学(大阪市・大阪府)

石田政成: 「系統連系インバータのリアプノフ関数に基づくデジタル制御の安定性に関する検討」, 電気学会半導体電力変換技術研究会, 2015年1月24日, 大阪工業大学(大阪市・大阪府)

石田政成: 「リアプノフ関数に基づく単相系統連系インバータの電流追従制御」, 電気学会産業応用部門全国大会, 2014年8月26日, 東京電機大学(東京・東京都)

T. Ogawa: "Automatic circuit partitioning for parallel simulation of a power electronic system," IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014年6月24日, サントンデール(スペイン)

秋山佑介: 「仮想抵抗によるLCLフィルタ付系統連系インバータの共振特性の抑制調整法」, 電気学会全国大会, 2014年3月18日~20日, 愛媛大学(松山市・愛媛県)

弘中亮太郎: 「設定特性を持つ回路合成法の検討」, 電気学会半導体電力変換技術研究会, 2014年1月24日~25日, 神戸大学(神戸市・兵庫県)

21 加藤利次: 「LCLフィルタ付系統連系インバータの設計における周波数特性解析」, 平成25年電気学会産業応用部門全国大会, 2013年8月28日~30日, 山口大学(山口市・山口県)

22 T. Kato: "Sinusoidal compensator with active damping effects in grid-connected inverter with an LCL filter," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp.4683 - 4688, 2013年9月15日~19日, デンバー(米国)

23 M. Ueda: "Lyapunov-based digital control of grid-connected inverter with an LCL filter," IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013年6月23日~26日, ソルトレークシティ(米国)

24 T. Kato: "Generalization of parallel analysis for a power electronic system by circuit partitioning," IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013年6月23日~26日, ソルトレークシティ(米国)

加藤 利次 (KATO TOSHIJI)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号：40148375

(2)研究分担者

井上 馨 (INOUE KAORU)  
同志社大学・理工学部・准教授  
研究者番号：60343662

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

弘中 亮太郎 (HIRONAKA RYOTARO)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
秋山 佑介 (AKIYAMA YUSUKE)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
上田 成彦 (UEDA SHIGEHICO)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
佐藤 真太郎 (SATO SHINTARO)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
小川 拓海 (OGAWA TAKUMI)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
石田 政成 (ISHIDA MASANARI)  
同志社大学工学研究科・学生(当時)  
麻布 昌志 (AZABU MASASHI)  
同志社大学工学研究科・学生  
大橋 功基 (OHASHI KOKI)  
同志社大学工学研究科・学生  
高見 悠基 (TAKAMI YUKI)  
同志社大学工学研究科・学生