

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06324

研究課題名(和文)グリッドシステムの連系拡大のための安定性の確保法の開発

研究課題名(英文)Development of Stability Assurance Method for Extension of Grid-Connected 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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、単相および三相インバータに適用可能な受動的に基づく系統連系インバータの制御法を開発した。特に三相の制御に関して、複素ベクトル理論に基づいて全帯域を受動化する簡潔な設計法の開発を行った。また弱いグリッド系においても、受動的なインバータを並列に連系させることにより安定化できることを確認し、インピーダンス法による安定化条件を導出した。さらにグリッド連系システムの汎用安定性解析法の開発に関して、非線形関数を含む系にも適用可能な汎用周波数解析シミュレータを開発した。本研究で開発した制御・判別・解析法は、系統連系システムの安定性の確保に活用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、再生可能な発電システム等を電力系統に接続して、そのエネルギーの効果的な活用を図るグリッド連系システムが開発されつつあるが、様々な形態の電力変換器群が連系されるために、それらの相互干渉によりシステムが不安定となり得ることが報告されている。この対応策として、本研究で開発した高安定な制御に基づく電力変換器の導入により、連系システムの安定性を向上させることが可能であり、また開発した安定判別および解析法は、実用的な電気インフラの安定性の確保に活用可能である。さらに本研究は、開発した制御・判別・解析法を相互に関連・融合させることにより、安定性を確保したシステムの将来の連系拡大に寄与することができる。

研究成果の概要(英文)：This research developed a passivity-based control of a grid-connected inverter both for single- and three-phase types. Especially a simple and effective design method based on the complex vector theory for a three-phase inverter is developed and it passivate the system for all frequency bands. When an inverter with the developed passive control method is connected in parallel, even a weak grid system is made more stable. Stabilization conditions are deduced by the impedance method. This research also developed a general-purpose simulator for frequency characteristic analysis and it can be applicable even to a system with nonlinear control elements. The developed control and analysis methods are applicable to ensure stability of a grid system.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：グリッド連系システム 安定化制御法 受動性 安定性判別法 汎用シミュレーション 周波数特性
フィードフォワード制御 デジタル制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

再生可能なエネルギーシステム等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が目指されており、グリッドシステムへの連系がますます広げられつつある。その中でその連系を担うインバータ・コンバータ等の電力変換器は、現在では家電用途から電力用途まで広範に用いられている。その際、例えば太陽光・風力発電機器を系統に連系するためには、これらに付随する電力変換器をいかに制御して系統と安定に連系するかが議論されている。そのために、まず個々の機器に対して誤動作して不安定とならないように、すなわち安定な動作が確保されるように設計されている。ところが、グリッドシステムには、多数のしかも様々な形態の電力変換器群が連系されるために、システムが不安定となり得ることが報告されている。そのため、系統の連系の際には、それらの相互作用の影響を考慮して、全体として安定に動作するように設計する必要があり、これらの対策が社会的にますます重要な課題となってきた。

これら系統連系における安定性の問題は、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ている。基本的にこれらにおいては、単体で設計した電力変換器の安定性を解析する方法が、様々に議論されている。この安定性解析は、電力変換器の出力アドミタンスと系統インピーダンスの積に Nyquist の安定性判別法を適用して行われる。そのためこの解析法はインピーダンス法と呼ばれ、インピーダンスやアドミタンスの周波数特性の計算法や測定法が解析のための重要な要素となっている。さらに、この Nyquist の安定性判別法を基にして、より実用的な方法が、現在様々に開発されつつある。しかしながら、様々な形態の電力変換器が連系された場合にどのように安定性を確保するかは、いまだ研究開発途上の段階にある。

2. 研究の目的

このような背景のもと、グリッドシステムの連系拡大のための安定性の確保は時宜をえた技術的課題であり、本研究は以下の安定性の確保のための制御・判別・解析法を相互に関連させて同課題を解決しようとする現在の社会的な要求に寄与しようとするものである。

(1) 電力変換器の高安定化制御法の開発

電力変換器の高安定化制御法の開発すでにエネルギー関数に基づく方法の1つであるリアブノフ関数に基づく制御法をすでに開発済であったが、この受動性を含む諸性質を明らかにして、さらなる活用を図る。さらに通常のフィードバック(FB)制御法に FF 制御による補正項を追加して、制御性を保ちつつ、受動性を高めて高安定化する設計法を開発する。その際特に、フィードフォワード(FF)制御における周波数特性の改善を進める。

(2) 安定性を確保したグリッド連系法の開発

様々な形態で電力変換器を連系した場合においても安定性判別可能な方法を開発する。既存の周波数特性に基づいたインピーダンス法においても、より一般的な安定性判別法を開発する。また時間領域においてポアンカレマップすなわち1周期の遷移行列による固有値解析に基づく安定性判別を行う。これらの判別法を様々な連系構成で適用できるように拡張していく。

(3) グリッド連系システムの汎用安定性解析法の開発

まず電力変換器の出力アドミタンスの周波数特性を汎用的に求めるためのシミュレータを開発する。また電力変換器の時間領域における遷移行列を汎用的に求めて安定解析を行う方法を開発する。これにより、対象システムの安定性解析を周波数および時間領域の双方から解析できるようにする。

3. 研究の方法

研究代表者を中心として、1人の研究分担者（同志社大学理工学部：井上馨）と11人の研究協力者（当時同志社大学理工学研究科学生：瀬政聖基、大上皓、中野宏昭、中嶋勇介、山本悠暉、南野暢基、博多秀矩、佐野竣哉、船木隆史、鶴飼椋平、兼子晶誠）とにより遂行された。それらは以下の3つの過程よりなされた。

(1) 電力変換システムの高安定化制御法の開発

現在論じられているエネルギー関数に基づく安定な制御法に関しては、調査のうへ、すでに開発済であった。DC-DC コンバータにおける FF 制御による受動性の確保法に関して調査を行うとともに、インバータに対して適用可能な方法の開発を行った。その上で従来の FB 制御法と組み合わせで安定かつ制御性能のよい方法を開発し、一般的設計法としてまとめた。開発した受動性に基づく高安定な制御法ではまず第1ステップで最適な FB 制御系を構成し、第2ステップでこれを受動化する FF 制御系を追加設計して安定化する方法を開発した。

(2) 安定性を確保したグリッド連系法の開発

現在論じられているグリッドシステムの安定性判別法に関してはすでに調査済であるが、現在進展中の文献等を含めてさらに広範囲に調査をおこなった。様々な構成で電力変換器が混在した場合にも適用可能な安定性判別法の開発を目指した。特に受動性を高めた電力変換器を連系システムにどのように挿入すればシステム全体の安定性の確保できるのかについて検討を行

った。

(3) グリッド連系システムの汎用安定性解析法の開発

電力変換器の出力アドミタンスの周波数特性を汎用的に求めるためのシミュレータの開発を行った。特に非線形制御要素を含む場合においても、汎用的に適用可能であるように拡張を行った。また電力変換器の時間領域における遷移行列を汎用的に求めて安定解析を行う方法を開発した。

4. 研究成果

(1) 受動性に基づく高安定化制御法の開発

本研究ではグリッド連系インバータの制御法に関して、受動性を確保することにより、高安定化することができる設計法を開発した。この方法ではまず第1ステップで最適なFB制御系を構成し、第2ステップでこれを受動化するFF制御系を追加設計して安定化する。そのためFB制御系の最適制御による設計により制御性を、またFF制御系の追加により安定性の両方を得ることができるものである。

(2) より一般的な安定性判別法に基づくシステム全体の安定性の確保

受動性を高めた電力変換器を連系システムに適切に挿入することにより、システム全体の安定性の確保するように条件を導出した。これにより、システム中に一部不安定となる電力変換器が存在しても、受動性を高めた電力変換器の挿入により全体として安定性を確保することができる。そのため、現実のシステムのように旧来の設計法で作成された電力変換器を多数含む系統であっても、高安定な電力変換器の挿入により、全体の安定性を確保できる。そのため実用的な電気インフラの安定性の確保に貢献可能である。

(3) 汎用的な周波数特性解析法の開発

インピーダンス法による安定性判別のためには、連系インバータの周波数特性の計算が必要であり、本研究では、汎用的に周波数特性解析が計算可能な手法を開発した。この手法は非線形制御要素を含む場合においても、動作点で線形化することにより汎用的に適用可能である。同手法による安定性解析結果と時間領域手法による安定性解析結果とを比較したが、あまり差異は見られず、実用的には開発手法による出力周波数特性を求めてインピーダンス法で安定判別する方法で十分である。

以上、本研究で開発した高安定な制御に基づく電力変換器の導入により、連系システムの安定性を向上させることが可能であり、また開発した安定判別および解析法は、実用的な電気インフラの安定性の確保に活用可能である。さらに本研究は、開発した制御・判別・解析法を相互に関連・融合させることにより、安定性を確保したシステムの将来の連系拡大に寄与することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

1. 著者名 Semasa Masaki, Kato Toshiji, Inoue Kaoru	4. 巻 7
2. 論文標題 Simple and Effective Time Delay Compensation Method for Active Damping Control of Grid-Connected Inverter with an LCL Filter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 454 ~ 461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.454	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加藤 利次, 井上 馨, 中島 勇介, 山本 悠暉	4. 巻 139
2. 論文標題 LCLフィルタ付グリッド連系インバータシステムの受動性に基づく安定化制御の設計法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 93 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejias.139.93	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Takami, Toshiji Kato, Kaoru Inoue	4. 巻 5
2. 論文標題 General-purpose computation method of a power converter for frequency characteristics: application to stability analysis of a grid inverter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	6. 最初と最後の頁 1466 - 1473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JESTPE.2017.2720538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Akinobu Kaneko, Ko Oue, Toshiji Kato, Kaoru Inoue
2. 発表標題 Computation of Frequency Characteristics of Grid Inverters by General Small-Signal Analysis Method
3. 学会等名 IEEE 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ko Oue, Shunya Sano, Toshiji Kato, Kaoru Inoue
2. 発表標題 Stability Analysis of Grid-Forming Inverter in DQ Frequency Domain
3. 学会等名 IEEE 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Yuki Yamamoto
2. 発表標題 Optimal Digital Controller Design for Passive Stabilization of a Grid-Connected Three-Phase Inverter with LCL filter
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本悠暉, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 グリッド連系三相インバータシステムのクラーク座標での受動性に基づく安定化制御法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鵜飼椋平, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 LCLフィルタ付三相系統連系インバータのデジタル制御における遅れ時間の補償法
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本悠暉, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 三相系統連系インバータの受動性に基づく安定化制御法
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 博多秀矩, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 パワーエレクトロニクス回路の時間領域による安定性解析
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兼子晶誠, 船木隆史, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 汎用小信号解析法による降圧チョッパ回路の周波数特性計算
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiji Kato, Kaoru Inoue, and Taiki Sakiyama
2. 発表標題 Stability Analysis Methods of a Grid-Connected Inverter in Time and Frequency Domains
3. 学会等名 The 2018 International Power Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Masaki Semasa, and Naoki Minamino
2. 発表標題 Effective Time Delay Compensation for Control of Grid- Connected Inverter with LCL Filter
3. 学会等名 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南野暢基・加藤利次・井上馨
2. 発表標題 インバータの制御演算遅れ時間の補償法の検討
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本悠暉・加藤利次・井上馨
2. 発表標題 受動的な系統連系インバータの並列接続による安定制御法
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 博多秀矩・加藤利次・井上馨
2. 発表標題 パワーエレクトロニクス回路のスイッチ感度を考慮した周期定常解析法
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南野暢基・加藤利次・井上馨
2. 発表標題 インバータのデジタル制御における遅れ時間の補償法の検討
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大上 皓,加藤利次,井上 馨
2. 発表標題 系統連系インバータのd-q小信号インピーダンスモデルの周波数解析
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Yuki Takami
2. 発表標題 Stability analysis using poincare map in the time-domain for grid-connected inverter
3. 学会等名 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Semasa, Toshiji Kato, Kaoru Inoue
2. 発表標題 A simple and effective time delay compensation method for grid-connected inverter with an LCL filter: Application to active damping method
3. 学会等名 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Yusuke Nakajima
2. 発表標題 Stabilization of grid-connected inverter system with feed-forward control
3. 学会等名 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 崎山大輝, 加藤利次, 井上馨, 高見悠基
2. 発表標題 系統連系インバータの安定性解析のための周波数特性 計算法
3. 学会等名 電気学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀬政聖基, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 LCLフィルタ付グリッド連系インバータの制御遅れ時間の補償法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋勇介, 加藤利次, 井上馨
2. 発表標題 フィードフォワード制御によるグリッド連系インバータシステムの受動性に基づく安定化法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
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 分 担 者	井上 馨 (Inoue Kaoru) (60343662)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	