

博士学位論文審査要旨

2022年12月23日

論文題目： Controller Design and Analysis for Grid-Forming Inverter
(Grid-Forming インバータの制御系設計および解析)

学位申請者： 大上 皓

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 加藤 利次

副査： 理工学研究科 教授 長岡 直人

副査： 理工学研究科 教授 井上 馨

要 旨：

再生可能エネルギーに基づく分散電源システムと電力系統とをつなぐ系統連系インバータの運用が近年進められつつある。連系インバータの容量が系統内の同期発電機の容量を大幅に上回る場合、系統との連系機能が自律的に制御可能な Grid-Forming インバータの適用が必要となる。本論文では、Grid-Forming インバータの制御方式に関して2つの新手法を提案している。まず第1の制御方式として、回転座標である dq 領域における電力および電圧制御法を提案している。またこの電圧制御に関して線形二次レギュレータ (LQR) に基づいた設計法を提案し、シミュレーションによってその妥当性を検証している。また、提案インバータと系統間の相互作用による安定性の判別を固有値解析とインピーダンス法により行っている。さらに第2の制御方式として、静止座標である $\alpha\beta$ 領域における電力および電圧制御法を提案している。提案制御原理は、複素ベクトル理論に基づいて多入力多出力 (MIMO) システムを単一入力単一出力 (SISO) システムとして変換するため、電力および電圧制御系の設計を簡潔化している。また電力制御や電圧制御のゲインの調整法も提案している。最後に提案制御法を、C 制御プログラムによる回路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り検証している。

本研究は Grid-Forming インバータに関して、 dq および $\alpha\beta$ 領域における電力および電圧の新しい制御法を開発し、その動作を安定性解析により明らかにしている。本研究は同インバータの開発への幅広い応用が期待できる。よって本論文は、博士 (工学) (同志社大学) の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2022年12月23日

論文題目： Controller Design and Analysis for Grid-Forming Inverter
(Grid-Forming インバータの制御系設計および解析)

学位申請者： 大上 皓

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 加藤 利次

副査： 理工学研究科 教授 長岡 直人

副査： 理工学研究科 教授 井上 馨

要 旨：

本論文の提出者は同志社大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程前期課程を2019年3月に修了し、2020年4月に本学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程後期課程に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は電気学会論文誌D部門のVol.140, No.9, pp.685-693 (2020)とVol.142, No.9, pp.680-688 (2022)、さらにIEEE 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, pp. 1-8 (2019)とIEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 985-991 (2021)に掲載済みでありすでに十分な評価を得ている。2022年12月23日午後3時30分より90分にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。講演後種々の質疑が行われたが、提出者の説明により、十分な理解が得られた。公聴会終了後、審査委員による学力確認のための口頭試問を実施したところ、論文提出者の十分な学力を確認することができた。また提出者は第一著者として国際会議で3件の英語の発表を行っており、また語学試験にも合格しており、高い英語能力を有するものと認められる。以上より、論文提出者の専門分野における学力並びに語学力は十分であることが確認された。よって総合試験の結果は合格と認める。

博士学位論文要旨

論文題目： Controller Design and Analysis for Grid-Forming Inverter
(Grid-Forming インバータの制御系設計および解析)

氏名： 大上 皓

要旨：

In near future, power converters will be introduced into transmission grids on a large scale due to increase of renewable energy sources. The control schemes of grid-connected inverters currently assume that there are sufficient synchronous generators (SGs) in the grid for synchronization and integration of electric power. These inverters are called “grid-following” inverters. However, when grid-connected inverters significantly outnumber SGs, there is a need for the “grid-forming” inverters to operate the transmission grid autonomously. These inverters should generate AC voltages, share power each other, and emulate the inertia effect like SGs.

To satisfy these requirements, different control schemes for grid-forming inverters have been proposed in the literature such as the droop control, virtual synchronous generator, and synchronverter for the power control, and cascaded PI controller for the voltage regulation. This dissertation proposes two control schemes for grid-forming inverters.

One control scheme is based on the dq domain for power and voltage control. the cascaded PI controller has been often used for the voltage regulation. However, it is difficult to tune the control gains because of system couplings and the controller’s bandwidths. This dissertation proposes a new controller based on the linear quadratic regulator (LQR) for voltage regulation and shows comparisons of the performances between them by simulations. It is also well known that the instability due to interactions between the grid-connected inverter and the grid is sometimes observed. The stability is compared for the grid-forming inverters with both the cascaded PI controller and LQR by the eigenvalue analysis and the impedance method.

The other control scheme is based on the $\alpha\beta$ -domain. With this controller, active and reactive powers can be controlled according to simple complex power control principles described only in the $\alpha\beta$ -domain. The control system is described based on complex vector theory, which models the system as single input single output (SISO) model so that the controller design is easier than dq - or $\alpha\beta$ -multiple inputs multiple outputs (MIMO) models. Controller gain tuning for both the outer power and the inner voltage regulator is also proposed; the power control gains are tuned based on transfer functions around an operating point and the voltage regulator is tuned by the LQR. The proposed control method is investigated and validated by simulations with a C control program and by experiments with a DSP-based digital control system.