

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03210

研究課題名（和文）標準化を指向したプラグ・アンド・プレイ電力インターフェイス変換器の開発

研究課題名（英文）Development of Power Converter with Plug-and-Play Function for Standardization

研究代表者

佐藤 之彦（Sato, Yukihiro）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50205978

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：再生可能エネルギー発電の大量導入を実現するには、発電、負荷、蓄電要素などが相互に緊密な連携を取った高度な制御を行う高機能小規模電力ネットワークが必要となる。本研究では、その実現のために、電力ネットワーク内での電力の変換やパワーフローの制御を担う電力インターフェイスとして大量に導入する半導体電力変換器のプラグ・アンド・プレイ機能による汎用化とそれに基づく標準化を実現するための研究開発を行った。複数台の電力インターフェイス変換器から構成される模擬システムを構築し、開発した制御法の有効性を実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化の防止のために温室効果ガスの排出量を削減することが世界的に求められており、発電分野における再生可能エネルギー導入量の飛躍的拡大が必須となっている。本研究で実現するプラグ・アンド・プレイ機能を備えた電力インターフェイス変換器により、再生可能エネルギー発電、負荷、蓄電要素が高度に連携した高機能電力ネットワークの実現が容易となりその普及が促進される。これにより、電力インターフェイス変換器の標準化や低価格化が進み、従来の電力システムからの円滑な移行が可能となることにより、再生可能エネルギー発電の導入量のさらなる拡大に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：To realize massive introduction of renewable energy power generation, small scale highly functional power networks with sophisticated coordinate control of power generation, loads, and energy storage devices are indispensable. In this research, power converters with plug-and-play function to realize the highly functional power networks are developed. To demonstrate effectiveness of the proposed control method, experimental verification employing prototype power network consists of multiple power converters has been carried out.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス スマートグリッド 再生可能エネルギー発電 プラグ・アンド・プレイ

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの発生量の削減は全世界的に喫緊の課題となっている。これらを達成するためには、再生可能エネルギーによる発電の導入量を飛躍的に拡大する必要がある。そのためには、太陽光発電や風力発電の発電電力変動を補償するための電力貯蔵要素、発電電力に応じて電力需要をリアルタイムでコントロールするデマンドサイドマネジメントなどを効果的に導入していく必要がある。しかし、これらを現在の商用電力システムに大規模に導入することは、電力会社による一元的な管理と整合しないため現実的ではない。この問題の有望な打開策の一つに、再生可能エネルギー導入比率の高い高機能小規模電力ネットワークを新たな基本単位として、これを従来からの電力システムに多数接続することにより、従来の電力システムを段階的に変革することが考えられる。この高機能小規模電力ネットワークでは、発電電力変動補償やデマンドサイドマネジメントなどの高度な制御を小規模電力ネットワーク内で完結することにより、従来の電力システムに対する影響を軽減することが可能となり、再生可能エネルギーの導入量を円滑に拡大することが可能となる。この高機能小規模電力ネットワークを実現するためには、電力ネットワークインターフェイスとなる電力変換器を大量導入する必要があり、その経済的で運用の容易な実現方法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、前述の高機能小規模電力ネットワークを実現するために、ネットワーク内での電力の変換やパワーフローの制御を担うために電力インターフェイス（電力 IF）として大量に導入する半導体電力変換器（以下、電力 IF 変換器という）の汎用化とそれに基づく標準化を実現するための研究開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、高機能小規模電力ネットワークの構成要素となる電力 IF 変換器として、接続点の状況に応じて柔軟で多機能な動作を同一のハードウェア構成で実現するプラグ・アンド・プレイ機能を有する電力 IF 変換器の開発を行うとともに、これを模擬電力ネットワーク内で複数台組み合わせ有効性を実証することを目指す。まず、三相電圧形インバータの主回路をベースとした汎用化電力変換制御が可能な電力 IF 変換器を実現する。次に、この電力 IF 変換器に設置点の状況に応じて適切な動作を実現するためのプラグ・アンド・プレイ機能を実装し、その有効性を実験により検証する。さらに、この電力 IF 変換器が複数接続された模擬電力ネットワークを構築し、自律分散制御と変換器間の通信によるネットワーク制御を組み合わせた協調制御を適用し、その有効性を実験により検証する。

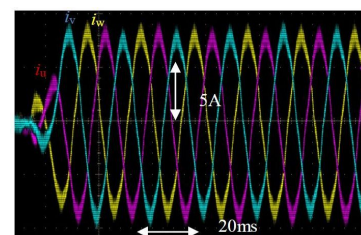
4. 研究成果

初年度の平成 29 年度は、電力 IF 変換器の単体の部分に関する開発を中心に実施するとともに、協調制御やネットワーク制御を実現するための技術課題を整理した。続いて、平成 30 年度は、接続された電力ネットワークの状況に関わらず安定な動作を実現するための制御系を開発するとともに、電力 IF 変換器の協調制御法、電力変換器間の通信制御の開発、模擬システムによる提案方式の有用性実証試験の準備を行った。さらに、最終年度の令和元年度は電力変換器汎用化技術の開発と、プラグ・アンド・プレイ制御の基盤技術の開発の成果をもとに、複数台の電力 IF 変換器から構成される模擬システムにおいて、種々の状況における有効性の検証実験を実施した。

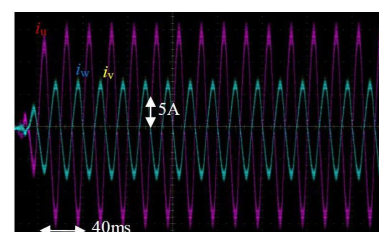
本研究における主な具体的成果の概要は、以下の通りである。

(1) 同一の主回路で多機能を実現する汎用化制御法

三相電圧形インバータの主回路を接続される系統の種類によらず共通に使用できる汎用電力変換器とするための制御法を開発した。具体的には、三相電圧形インバータを三相および単相の系統連系インバータ、自励整流回路、2 象限チョップとして動作させるための汎用化制御と、これらに共通に対応できる変調方式の基本的考え方を整理し、実際の制御回路に展開した。特に、三相インバータの電流制御においては、一般に直交座標変換と PI 補償器が用いられるが、接続対象を単相交流系統や直流に拡張するために、座標変換によらず共振回路の伝達関数を持つ電流制御器を導入する方式とした。さらに、試作装置を構築するための制御回路および主回路を実装し、単体での動作試験を実施した。図 1 に一例を示す指令値急変時の交流系統側の電流波形の過渡応答の実験結果では、三相交流系統においても単相交流系統においても交流側電流がその指令値に良好に追従できることを確認した。



(a) 三相交流系統

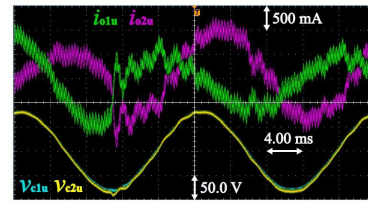


(b) 単相交流系統

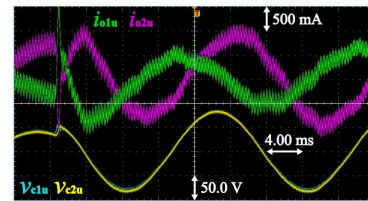
図 1 汎用化制御法による交流電流の実験結果

(2) 設置点の状況によらず安定動作を実現するダンピング制御法

プラグ・アンド・プレイ制御技術の開発に関しては、接続点によらず安定な動作を保證するための制御法の確立が課題であった。その具体的手法として、三相電圧形インバータの主回路に関して、交流側の電圧・電流、直流側の電圧・電流から、接続される系統の状態に応じて適切な動作を実現するための制御法の検討を行った。当初は系統の回路パラメータを推定し、それをもとに制御系のパラメータを調整する方式を検討することとしていたが、スイッチングリプルを除去するLCフィルタのキャパシタと系統インダクタンスとの共振を抑制できれば実用上問題がないことを確認し、これを汎用化した制御法を採用することとした。具体的には、電流制御を行う変換器においては、系統側の電流制御に高調波フィルタのキャパシタに等価的に並列に接続される抵抗を模擬したダンピング制御を組み込むこととした。また、系統電圧の維持を担う電力変換器においては、前述のダンピング制御を組み込んだ電流制御の外側に電圧制御系を付加した構成とすることとした。これらの電流制御と電圧制御を適用した複数の変換器を模擬系統に混在させた実験を行い、問題のない動作が実現できることを確認した。図2は、その実験的検証において、系統電圧指令値を急変させた場合の系統側の電圧、電流の実験波形の一例であり、本研究で導入したダンピング制御により過渡変化による共振が効果的に抑制されていることが確認できる。



(a) ダンピング制御なし



(b) ダンピング制御あり

図2 電圧指令値急変時の電圧、電流の実験波形

(3) 複数台の電力変換器が接続されることによる相互干渉の回避法

同一の電力ネットワークに多数台の電力IF変換器が接続されることによる懸念される相互干渉について検討を行った。その結果、ネットワークに並列に接続される複数のインバータのスイッチングリプル電圧の位相がずれている場合に、インバータ間にリプルによる横流が発生する問題があることが明らかとなった。特に、PWM制御のスイッチング周波数を同一に設定した場合において、複数のインバータの制御系の個体差による微妙なスイッチング周波数のずれが生ずる問題があり、これにより低周波のビート状のリプル電流の横流が特に顕著となることが確認された。この横流の影響を軽減するための方策として、個々のインバータのスイッチング周波数を意図的にずらすことの有効性を実験的に明らかにした。

(4) 電力IF変換器間の通信方式と通信の効果の検討

並列接続された複数のインバータ間の協調制御として、通信を行わないで実現できる方法として広く検討されているドループ制御について検討を行った。この方法では、インバータ間の通信を用いることなく電力配分を任意に調整することが可能である反面、その際に周波数や電圧がその設定値から偏差を生ずる本質的な問題があることを詳細に確認した。これを踏まえ、当初から計画していたインバータ間の通信について検討を行った。通信方式については、産業用途や自動車などで実績が豊富で導入が容易なCAN BUSを採用して原理的な検証を行うこととした。このCAN BUSによる通信を、模擬系統を構成するインバータ間の通信に導入し、その効果を検討した。インバータ間の通信によって、周波数や電圧の偏差を生ずることなくインバータ間の負荷配分を自在に変更できることについては、原理的に明らかであり、理論的な検討を中心に効果を整理した。さらに、一部のインバータが投入や解列される場合の系統全体の制御の指令値の引継ぎについては、模擬系統による詳細な検討を行い、実用上の問題を軽減できる制御変数の引継ぎ法について、いくつかの候補となる方式を明らかにした。また、インバータの投入や解列の情報をCAN BUS経由で共有することについて、その具体的実現法に関して切り替え時の影響の軽減の観点からの検討を行った。

(5) 投入・解列時の安定動作の検討

並列接続されたインバータの投入・解列時の実用上の問題点として、過渡的な電流の発生について詳細に検討した。特に問題となる突入電流の軽減のためには、投入するインバータの電圧を系統の電圧と同期させ、電圧の瞬時値をできるだけ一致させる必要があり、接続前の系統電圧の瞬時値の情報をどのようにインバータに取り込むかを想定したセンサ回路や制御回路を実現す

る上での課題を指摘した。また、投入前の同期の厳密性の要求を緩和する方策として、制御上の仮想インピーダンスを挿入する方式についても検討し、その有効性をシミュレーションにより確認した。以上を踏まえ、プラグ・アンド・プレイ機能を実現する上での実用上の課題とその解決策について整理し、制御方式の具体化の指針を与えた。

以上の成果により、プラグ・アンド・プレイ機能を有する電力 IF 変換器に関して、主回路方式、インバータ間の連携制御をも含む制御方式の確立につながる要素的研究成果を体系的に得ることができた。さらに、複数の電力 IF 変換器を模擬系統に接続した場合の検討により、複数台が接続されたインバータ間で発生する制御法の諸課題についても、その解決に向けた知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 江刺家 葉月, 名取 賢二, 佐藤 之彦
2. 発表標題 複数の電力変換器の並列運転時における 出力電流リップル及び負荷電流リップルの関係性に関する考察
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 Hazuki Esashika, Kenji Natori, Yukihiro Sato
2. 発表標題 A Universal Control Method to Realize Plug-and-Play Converters for Microgrids
3. 学会等名 International Conference on Power Electronics ECCE Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川 歩美, 名取 賢二, 佐藤 之彦
2. 発表標題 独立系統を構成するインバータの 電流制御への共振抑制制御の適用
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

〔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	名取 賢二 (Natori Kenji) (70545607)	千葉大学・大学院工学研究院・助教 (12501)	