

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01305

研究課題名（和文）プラグ・アンド・プレイ電力変換器の適応機能による同一系統内多数共存技術

研究課題名（英文）Coexistence technology of multiple plug-and-play power converters by adaptive function

研究代表者

佐藤 之彦（SATO, YUKIHIKO）

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） 13,660,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高機能次世代電力ネットワークを構成する多数台のプラグ・アンド・プレイ機能を有する電力インターフェイス変換器を、同一系統内に多数台共存させる技術を確立することを目的として実施した。具体的には、ビート現象回避のための適応的スイッチング周波数設定技術、不安定現象を回避するアクティブダンピング制御の動的ゲイン設定技術、高調波抑制LCフィルタ多数台接続時の動的共振回避制御、電力変換器の故障に伴う事故電流の高速抑制制御について理論的および実験的検討を行った。また、電力HILを導入した多数台電力変換器ネットワーク評価システムを新たに開発し、提案した制御法の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにするカーボンニュートラルが全世界的な課題となっており、その解決策のひとつとして再生可能エネルギーを電源の主力とする取り組みが進められている。再生可能エネルギー電源として有力な太陽光発電や風力発電は、天候の影響を受けて発電量が大きく変動するため、蓄電装置を併用することが必要であり、発電要素、蓄電要素、負荷が高度に連携して機能する次世代電力ネットワークを構築する必要がある。本研究は、その際の汎用的な構成要素として多数台が協調して導入される電力インターフェイス変換器の実現を目指すものであり、カーボンニュートラルの実現に大きく寄与するもので社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This study was carried out with the aim of establishing technology that allows multiple power interface converters with plug-and-play functions, which constitute a highly functional next-generation power network, to coexist in the same system. Specifically, theoretical and experimental studies were conducted on (1) adaptive switching frequency setting technology to avoid beat phenomena, (2) dynamic gain setting technology for active damping control to avoid unstable phenomena, (3) dynamic resonance avoidance control when multiple harmonic suppression LC filters are connected, and (4) high-speed suppression control of fault currents due to power converter failures. In addition, (5) a new multiple power converter network evaluation system incorporating power HIL was developed to verify the effectiveness of the proposed control method.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：スマートグリッド 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策は全世界での喫緊の課題となっており、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。このような状況を受けて、2018 年に取りまとめられた第 5 次エネルギー基本計画において、2050 年に向けて再生可能エネルギーを主力電源に位置づける方針が打ち出されている。太陽光発電や風力発電を大量導入する際には、発電電力変動を補償するための電力貯蔵要素、発電電力変動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ージメント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、図 1 に示すような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構成し、これを構成単位として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徐々に置き換え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ー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。

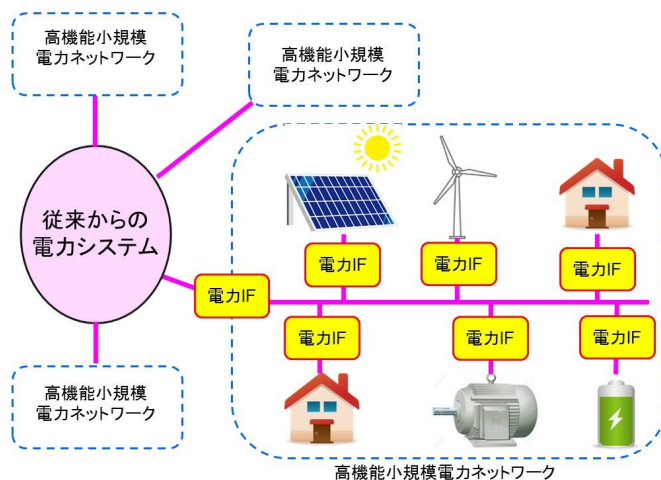


図1 高機能小規模電力ネットワークが多数接続された電力システム

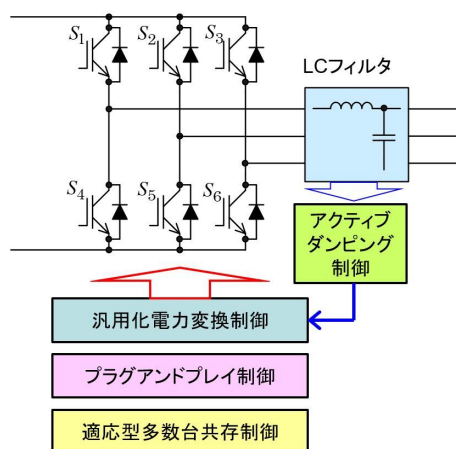


図2 PnP 電力 IF 変換器の基本構成

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ー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。

申請者らは、平成 29 年度より令和元年度にかけて科学研究費補助金基盤研究(B)「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」を受け、この高機能小規模電力ネットワークを実現するための電力インターフェイス (電力 IF) としての大量導入に適する図 2 に示すプラグ・アンド・プレイ機能を有する半導体電力変換器 (以下、PnP 電力 IF 変換器という) の研究開発を行ってきた。この PnP 電力 IF 変換器は、直流、単相交流、三相交流のいずれにも対応できる汎用化電力変換制御に、接続された電力ネットワークの状況を踏まえて制御パラメータを自動調整するプラグ・アンド・プレイ制御を組み合わせることを基本とする。さらに、交流側にはスイッチング高調波除去用の LC フィルタを接続し、その共振に起因する問題を回避するためのアクティブダンピング制御を適用する。これまでの研究では、最終的に PnP 電力 IF 変換器を 4 台接続した模擬電力システムを構築し、基本的な有効性を検証することができた。

この PnP 電力 IF 変換器による図 1 に示すような電力ネットワークの構築を考えると、多数台の PnP 電力 IF 変換器が相互干渉等により不安定現象などを起こすことなく共存できることが必須である。これまでの、申請者らの検討では、電力ネットワークと個々の PnP 電力 IF 変換器の関係については考慮したが、複数接続される PnP 電力 IF 変換器相互の干渉の考慮とその対策については今後の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が開発した PnP 電力 IF 変換器の実用化を見据え、同一の電力ネットワークに多数台接続する際の相互干渉等による不安定現象などを回避できる適応的制御法を開発するものである。多数台の変換器が接続されることに起因して懸念される問題点として、以下を検討対象とする。

- 個々の電力変換器のスイッチング周波数の差に起因するビート現象や横流の発生
- 個々の電力変換器に接続されるスイッチング高調波除去用 LC フィルタの共振を抑制するためのアクティブダンピング制御の相互干渉
- 個々の電力変換器に接続される複数の LC フィルタによる複合的な共振現象の発生
- 一部の電力変換器の故障の波及による電力ネットワーク全体の停止

本研究では、これらの問題の解決策として、個々の電力変換器の入力電流の全実効値や周波数成分の変化を検出し、スイッチング周波数や制御パラメータを適応的に変更する制御法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、PnP 電力 IF 変換器の多数台共存技術の開発を最終目標とし、前項の ~ の開発項目について、図 3 に示す全体スケジュールに基づいて令和 3 年から令和 5 年にわたり研究を進めた。研究代表者である佐藤は、研究計画の中で回路動作面での検討と全体の研究総括を、研究分担者の名取は、制御性能面での検討を中心に担当した。また、本研究は当研究室の中心的な研究テーマと位置付け、大学院修士課程学生と学部卒業研究生の参画を得て推進した。

【令和 3 年度の実施内容】

- 図 3 における実施項目 ~ については、これまでの検討結果も踏まえて、現有のシミュレーションソフト PSIM を用いて問題点の解析を進め、解決策となるスイッチング周波数の適応的設定法や、アクティブダンピングの制御ゲインの適応的自動調整法を具体的に立案した。さらに、その有効性をシミュレーションレベルで検証した。
- 実施項目 に関して、新規に検討を開始する必要があるため、年度後半から事故電流のシミュレーション結果をもとに、高速電流抑制制御の具体的方法を検討した。
- 実施項目 に関しては、新たに調達する HIL の使用環境が整い次第、これまで構築してきた PnP 電力 IF 変換器を移植する作業に着手した。さらに、図 4 に示すように HIL により最大 4 台

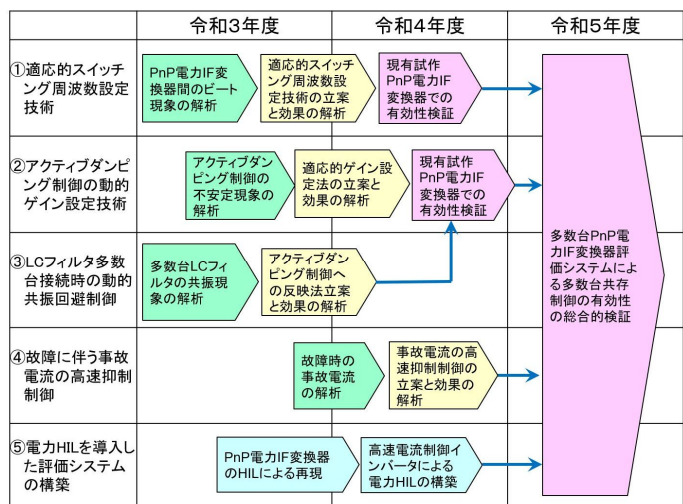


図3 研究の全体スケジュール

までのPnP電力IF変換器を等価的に実現できるように拡張した。

【令和4年度以降の実施内容】

- 実施項目 ~ の制御法については、現有のPnP電力IF変換器に適用し、最大4台までの範囲で有効性を実験的に検証するとともに、必要に応じて制御法に修正を加えた。
- 実施項目 に関して、新たに製作する高速電流制御インバータをHILに組み合わせ、最大4台までのPnP電力IF変換器を等価的に実現し、図4に示す評価システムを構築した。
- 実施項目 で構築した評価システムにおいて、現有のPnP電力IF変換器に実施項目 ~ において開発した制御法を段階的に適用し、総合的な有効性を検証した。

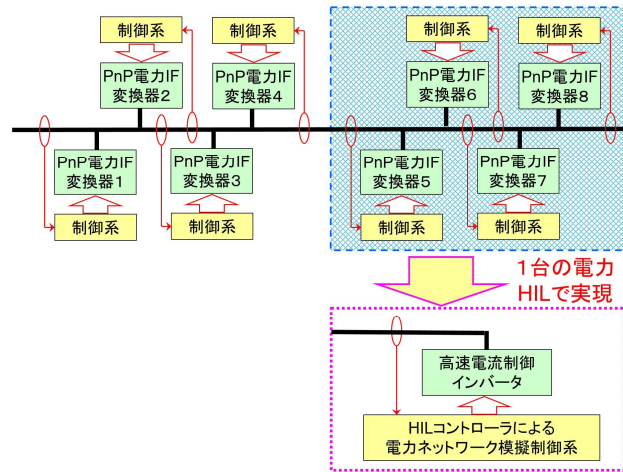


図4 電力HILを導入した多数台PnP電力IF変換器評価システムの構成

4. 研究成果

令和3年度は、プラグ・アンド・プレイ電力変換器の多数台共存技術の基礎として、複数の電力変換器が多数台並列に接続された場合の諸問題のシミュレーション解析を体系的に行った。具体的には、電力変換器のスイッチング周波数のずれ等に起因する横流の発生機構を考察し、その低減に向けた指針を整理した。さらに、電力変換器の制御系や交流側フィルタの影響を総合的に考慮した安定性確保のための条件について明らかにし、制御ゲイン設定の指針を整理した。これらをもとに、ビート現象回避のための適応的スイッチング周波数設定技術、不安定現象を回避するアクティブダンピング制御の動的ゲイン設定技術、高調波抑制LCフィルタ多数台接続時の動的共振回避制御について、基本方針を整理した。また、プラグ・アンド・プレイ電力変換器の機能を主回路と制御部の各階層に整理し、パワーエレクトロニクス・ビルディング・ブロックの考え方で整理することについても検討を行った。

さらに、多数台電力変換器による電力ネットワークの実験検証システム実現のために新たに導入するHILについて準備的な検討を進めた。具体的には、HILによる演算結果を受けて複数台の電力変換器と等価に動作する高速制御インバータによるパワーHILについて、評価システム全体をPSIMによるシミュレーションで実現し、パワーHILの適用上の留意点と、適用限界について体系的な知見を得た。

令和4年度は、このパワーHILに対して、プラグ・アンド・プレイ(PnP)電力インターフェイス(IF)変換器の制御法の移植を行った。さらに、これに高速電流制御インバータを組み合わせ、最大4台までのPnP電力IF変換器を等価的に実現できる実験評価システムの構築を進めた。具体的な検討課題として、電圧源的に動作させる変換器と電流源的に動作させる変換器が種々の組み合わせで混在する場合の等価的な実現法について検討を行い、問題点を整理した。さらに、等価的に実現する変換器の動作条件の変更を再現するための基本的な動作を確認した。

並行して、この評価システムにおいて、PnP電力IF変換器を多数台接続した場合に問題となることが予想されるビート現象回避のための適応的スイッチング周波数設定技術、不安定現象を回避するアクティブダンピング制御の動的ゲイン設定技術、高調波抑制LCフィルタ多数台接続時の動的共振回避制御について、これまで行ったシミュレーションに加えて、種々の場合につ

いて検討を拡充するとともに、実験的検証を行うための基礎的な知見を得た。

あわせて、電力変換器の故障に伴う事故電流の高速抑制制御に関して、その具体的方法の検討を進めるとともに、電力 HIL を用いた実験的検証の進め方について検討した。さらに、複数台の変換器からなる系統における変換器故障時の応急運転法に関する検討を行い、直流出力の脈動を回避できる応急運転法の基本的な考え方を明らかにし、電気学会の研究会で発表を行った。

令和5年度は、前述の電力 HIL を用いて、プラグ・アンド・プレイ (PnP) 電力インターフェイス (IF) 変換器を模擬し、これに高速電流制御インバータを組み合わせ、最大4台までの PnP 電力 IF 変換器を等価的に実現できる実験評価システムを構築した。さらに、この評価システムにおいて、PnP 電力 IF 変換器を多数台接続した場合に問題となることが予想されるビート現象回避のための適応的スイッチング周波数設定技術、不安定現象を回避するアクティブダンピング制御の動的ゲイン設定技術、高調波抑制 LC フィルタ多数台接続時の動的共振回避制御について、これまでのシミュレーション結果に対応した実験的検証を行った。あわせて、電力変換器の故障に伴う事故電流の高速抑制制御に関して、高速電流抑制制御などの具体的対処法の検討を進め、実験的検証を行った。

以上を踏まえ、本研究で検討したプラグ・アンド・プレイ電力インターフェイス変換器を同一系統に多数台導入する際に予想される問題点に関して、主回路に関連するハードウェアレベルの問題点と制御上の問題点について、解決に向けた体系的な知見を得るとともに、実験的検証により検討結果の妥当性の検証を行った。今後は、これらの成果をさらに整理し、对外発表や論文の取りまとめを行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上崎文也, 名取賢二, 佐藤之彦
2. 発表標題 二相運転する耐故障系統連系インバータの導入可能条件に関する検討
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換・モータドライブ研究会資料
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石黒 絢也, 名取 賢二, 佐藤 之彦
2. 発表標題 モジュール構成による電力変換器の 機能拡張に関する研究
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 2022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・准教授 (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------