

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18069

研究課題名(和文) 太陽光発電および二次電池を含む宅内直流システムにおける安定制御に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Stabilization Method for Residential DC System including PV System and Battery

研究代表者

柿ヶ野 浩明 (Kakigano, Hiroaki)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：30437371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：直流システムを宅内に適用する場合、機器の寿命や家族構成の変化などに応じてシステム構成を柔軟に変更できることが望ましい。そこで研究者らは、これまでに直流出力機器を自由に着脱できる直流用の分電盤を提案してきた。この場合、複数の変換器が分電盤に接続することから、変換器の負性抵抗特性によるシステムの不安定性が懸念となる。本研究では、この問題を解決するため受動性に基づく安定条件を用い、直流分電盤を有する宅内直流システムにおける変換器の制御法と安定化に関する検討を行った。結果、本研究で考案した制御法により、変換器が安定に動作することを実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：In a dc system, we assume a dc distribution board that can be attached and detached to the dc output equipment flexibly. In previous researches, stable criteria based on the impedance ratio conditions were proposed. These criteria can treat one-way power transfer from a power source to a load. However, if a system has equipment that can change the power flow direction such as secondary batteries, it is difficult to apply the impedance-based conditions. We studied a stabilization method using a passivity-based stability criterion in a residential dc system. Positive Feed-Forward (PFF) control was adopted to satisfy the passivity-based stability criterion. Experimental results show that the input bus voltage of a buck converter was stable when it satisfied the passivity condition.

研究分野：電気電子工学

キーワード：パワーエレクトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題や脱原子力、化石燃料依存の軽減などを背景として、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が進んでいる。しかし、これら自然エネルギー発電は天候による出力変動が大きいことから、大量導入により商用系統が不安定となることが懸念される。日本の電力会社の一部は、再生可能エネルギーの接続認定保留を行っており、今後は余剰電力を商用系統側に逆流抑制しつつ電力を有効に利用するために、再生可能エネルギーとセットで二次電池が導入されることが一般的になると考えられる。

二次電池をシステムに接続する場合、交流で構成された一般的なシステムでは、各機器の連系インバータそれぞれが単独運転検出装置や FRT(Fault Ride Through)機能を持つ必要がある。また、自立運転を行う場合、非線形負荷や突入電流などに対する対応をインバータ全体で協調して行う必要がある。

一方、直流で構成されたシステムでは、連系インバータを1台とすることにより、単独運転検出や FRT 機能を集約できる。また、直流で接続されている機器は、交流のように同期を取ったり無効電力の制御をしたりする必要がない。さらに、自立運転時は、一台のインバータより負荷に電力供給するので、交流システムと比較して制御が容易となる。加えて、直流接続間では DC-DC コンバータのみを介するだけでよいので、変換段数が少なくなり、システムの高効率化が期待できる。

宅内において直流システムの適用を想定した場合、家族構成や機器の寿命などに応じて、システム構成を柔軟に変更できる必要がある。そこで、太陽光発電や二次電池を着脱できる「直流分電盤」の導入を提案した。図1に直流分電盤の概念図を示す。直流分電盤により、直流出力機器を柔軟に着脱することができ、また系統連系に必要な機能は、分電盤内部の連系インバータに集約できる。

### 2. 研究の目的

直流分電盤を介して種々の直流機器 (DC-DC コンバータ) を接続した場合、各々の直流機器の制御が干渉し合い、システムが不安定になることが懸念される。そこで本研究では、直流分電盤を有する住戸を想定し、システムの安定性および制御法について検討を行うことが目的である。具体的には、受

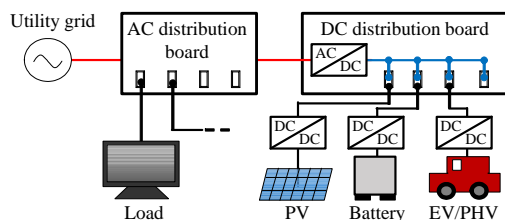


図1 直流分電盤の概念図

動性を用いた安定条件をベースに、システムの安定性に必要な直流機器の条件 (出力インピーダンスなど) を求める。また、それを満たすための回路および制御法について理論およびシミュレーションによる検討を行い、実機による検証を行った。

### 3. 研究の方法

受動性を用いた安定条件をベースに、システムの安定性に必要な直流機器の条件 (出力インピーダンスなど) を求めた。また、それを満たすための回路および制御法について理論およびシミュレーションにより検討した。

システムの構成を図2に示す。電源側は DC48V の直流電源であり、負荷側は、降圧チョッパと抵抗負荷で構成され、降圧チョッパが負荷電圧を 24V に維持することにより、降圧チョッパを含めた負荷側の変換器は定電力負荷として動作する。

この構成において、変換器の入力アドミタンスが受動性の条件を満たすための変換器の回路パラメータおよび制御法について、理論的な検討と MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションによる解析を行い、直流バスに接続する直流機器に必要な条件を明らかにした。

### 4. 研究成果

#### (1) 定電力負荷による不安定性と受動性

出力電圧一定制御のために負帰還制御をしている変換器の多くは入力側からみると定電力負荷として扱われる。定電力負荷の電圧-電流特性において、 $dv/di$  はある動作点での接線の傾きに等しく、値は負となる。このため、条件によって配線の抵抗成分を打ち消し、配線インダクタと入力コンデンサとの間で発振を生じることが知られている。

1ポートの回路網において、内部に電源を持たずエネルギーを消費するのみであるならば受動性が満たされる。その際の入力アドミタンスは正実関数であることが知られている。この時、入力アドミタンスの実部は常

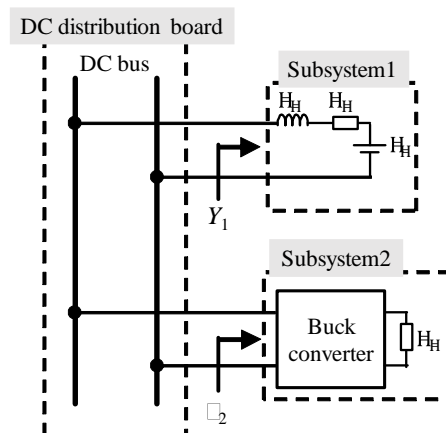


図2 システムの構成

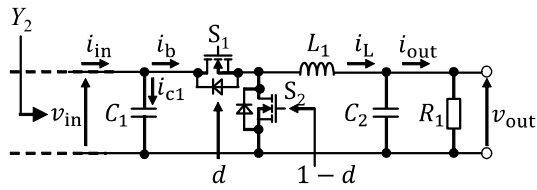


図3 降圧コンバータの回路図

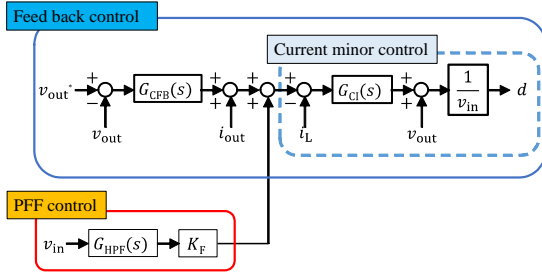


図4 降圧コンバータの制御ブロック

に正になる。逆に入力アドミタンスが正実関数であり実部が常に正であるならば受動性を満たしシステムは安定となる。

(2) 降圧コンバータの入力アドミタンス

本研究では受動性に基づく安定化手法の第一段階として電源側から負荷側への電力伝送についての検証を行った。図2に示した直流システムは降圧コンバータ、直流電圧源、直流分電盤、配線インピーダンスで構成され

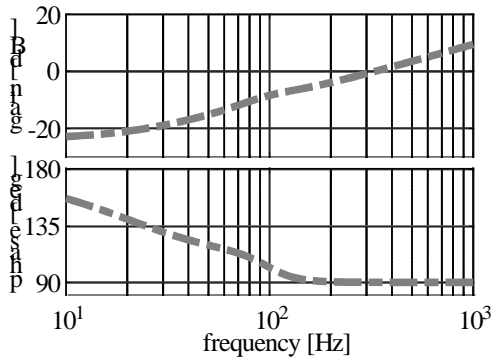


図5 PPF制御なしの入力アドミタンス

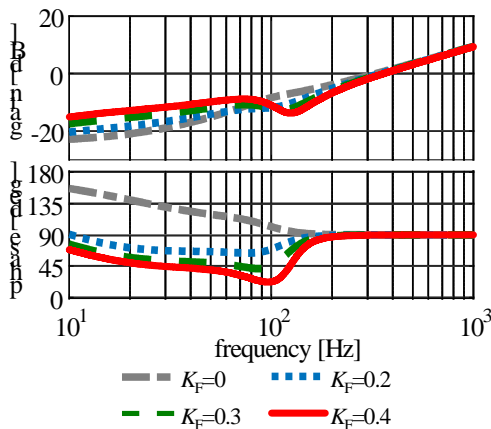


図6 PPF制御ありの入力アドミタンス

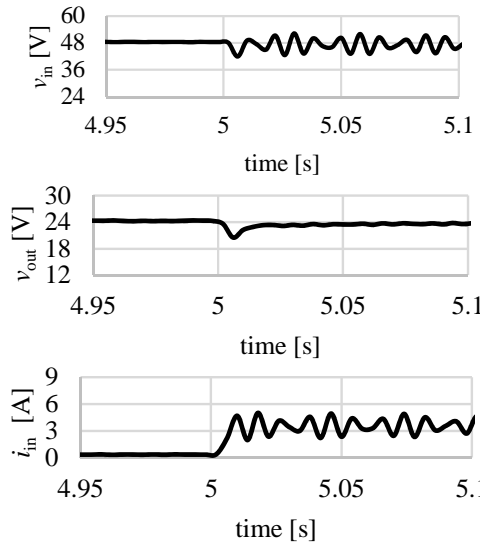


図7 PPF制御なしの実験結果

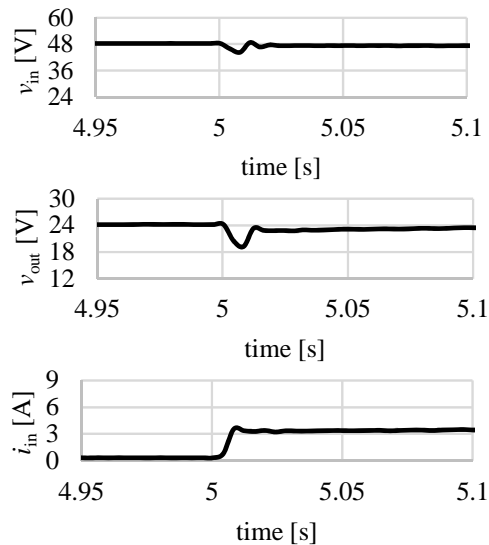


図8 PPF制御ありの実験結果

ている。直流分電盤は直流バスで構成されている。

降圧コンバータの回路図と制御ブロックを図3、図4にそれぞれ示す。G\_CFB(s)、G\_CI(s)は電圧制御、電流マイナーループ制御のPI制御の伝達関数である。G\_HPF(s)はPPF制御のハイパスフィルタ(HPF)の伝達関数、K\_FはPPF制御のゲインである。降圧コンバータの入力アドミタンスの周波数応答をMATLAB/Simulinkを用いて求めた。図5にPPF制御が無い場合、図6にPPF制御を加えた場合の入力アドミタンスの周波数応答のボード線図を示す。PPF制御が無い場合、図5より入力アドミタンスの位相はいずれの周波数においても±90°の範囲内に収まっておらず、受動性を満たしていないことが分かる。一方、PPF制御が有る場合、図6に示すようにK\_Fが大きいほどより低い周波数以上で位相が±90°の範囲に収まり、受動性を満たすことが分かった。

### (3) 実験による検証

PFF 制御の効果について実験による検証を行った。PFF 制御が無い場合と有る場合の負荷変化前後の降圧コンバータの入力電圧・電流、出力電圧波形を測定した。PFF 制御の HPF のカットオフ周波数  $f_c$  は 10 Hz、PFF 制御ゲイン  $K_F$  は 0.2 とした。負荷を 38  $\Omega$  (消費電力 15 W) から 3.8  $\Omega$  (消費電力 150 W) に 5 s でステップ変化させた。消費電力 150 W の時、式(9)の条件を満たさず、PFF 制御が無い場合は不安定となる。

PFF 制御無しの場合の波形を図 7 に示す。PFF 制御が無い場合は負荷変化後に入力電圧に持続振動が生じた。負荷変化後の入力電圧は 40 V から 58 V の間を振動していることが分かった。

次に、PFF 制御を加えた場合の波形を図 8 に示す。PFF 制御有りの場合は入力電圧、電流は、負荷変化後は収束に向かった。出力電圧の負荷変化後も収束に向かった。不安定条件において、PFF 制御により入力電圧・電流が安定となることを実験により確認した。

### (4) まとめ

受動性に基づく安定化手法を用い、宅内直流システムにおける変換器の制御法と安定性に関する検討を行った。電流マイナーループ制御において入力電圧、出力電圧の値をフィードフォワードし、実用的な制御ブロックにて入力アドミタンスおよび仮想アドミタンスの式を導出した。PFF 制御を追加することで、降圧コンバータの入力に仮想アドミタンスが並列に追加され、降圧コンバータの入力アドミタンスの位相が  $\pm 90^\circ$  の範囲に収まることをボード線図により確認した。また、PFF 制御の妥当性をシミュレーションと実験により確認した。PFF 制御無しの場合、負荷変化後の直流入力電圧・電流に持続振動が生じ、不安定となった。PFF 制御を加えた場合、負荷変化後の直流入力電圧・電流は収束に向かい安定となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文](計 1 件)

山野裕輝, 武智滉司, 柿ヶ野浩明, 大橋誠, 宅内直流システムに適用可能な受動性に基づく安定化手法の実験的検証, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), 査読有, vol. 137, no. 2, 2017, 631-638  
DOI: 10.1541/ieejias.137.631

### [学会発表](計 4 件)

横井健志, 武智滉司, 柿ヶ野浩明, PRBS を用いた電力変換器によるインピーダンス測定法に関する検証, パワーエレクトロ

ニクス学会第 221 回定例研究会, 2017  
武智滉司, 柿ヶ野浩明, 宅内直流システムの受動性判別を可能とする電力脈動補償回路の提案, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 2017

Hiroki Yamano, Hiroaki Kakigano, Research for Stabilization of Residential DC Systems -Attempt of Experimental Verification of Stabilization Based on Passivity, 2016 Joint Academic Forum between Thai-Nichi Institute of Technology and the Japan University & Company Research Group, 2016

山野裕輝, 柿ヶ野浩明, 宅内直流システムに適用可能な受動性に基づく安定化手法の実験的検証, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柿ヶ野 浩明 (KAKIGANO, Hiroaki)  
立命館大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 30437371