

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420250

研究課題名(和文)再生可能エネルギーを利用した分散電源に適した系統連系ソフトスイッチング電力変換器

研究課題名(英文)Soft-Switched Converter with Renewable Energy Source for Smart Grid

研究代表者

石川 裕記 (ISHIKAWA, Hiroki)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90273119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではスマートグリッドで適用可能な電力変換システムを提案し、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性の検証を行った。電力変換システムは、入力を再生可能エネルギーによる発電電力とし、これをいったん電気二重層コンデンサに蓄え、出力高調波の少ない並列多重電流形インバータにより売電もしくは系統電圧安定化制御を行う。電気二重層コンデンサへの充電にはソフトスイッチングを導入した降圧チョッパを適用し、その安定動作および高効率を実現した。並列多重電流形インバータおよび配電系統モデルによる系統電圧安定化制御の検証においては無効電力の注入が系統電圧上昇の抑制に有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In the project, a novel power conversion system for smart grid application was proposed, and the validity and effects of the system were demonstrated by simulation and experiment. The system consists of renewable energy source as a power source, a soft-switched buck chopper, electrical double layer capacitors (EDLCs) as a energy storage, and interconnected parallel current source inverters (parallel-CSIs). The soft-switched chopper realized the maximum power point tracking of the photovoltaic generation system and suitable energy charge to EDLCs. The parallel-CSIs also realized reactive power control for the suppression of the increased distribution line voltage caused by reverse power flow.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ソフトスイッチング MPPT制御 充電制御 並列多重インバータ EDLC 高周波スイッチング

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電 (PVG) や風力発電 (WG) による発電電力は、唯 1 点の最大電力を発電する動作点 (最大電力点) を持っている。最大電力点は気象条件に左右されるため、効率よく電力を得るには常に動作点を最大電力点に追従させる必要がある。これを実現する制御を MPPT という。

PVG や WG 用と称したソフトスイッチング電力変換器 (SS-Conv.) は、国内外を問わず、数多くある。しかし、太陽電池や風力発電機の特性を考慮していない SS-Conv. も多い。また、MPPT も実現した SS-Conv. は数少ない。PVG や WG の端子電圧が気象条件によって変動する、PVG や WG への回生電流が許されないという制約条件により、ソフトスイッチング条件を満足することが難しくなるためである。加えて、本研究課題で掲げている低圧大電流出力の SS-Conv. は国内外を問わずほとんどない。さらに、学会活動等による調査により、以下の点が明らかとなってきた。

- ・プラグインハイブリッド自動車 (PHEV) や電気自動車 (EV) の実用化にともない、将来的にこれら以外の負荷も含めた、電力系統への一時的な大量の重負荷接続の可能性とその問題点
- ・東日本大震災以降に特に注目度が高くなっている、再生可能エネルギーによる大量の分散電源導入の可能性とその問題点
- ・PHEV や EV、分散電源等に使用される高性能バッテリーの恒常的使用の可能性とその問題点

いずれの点も電力系統の安定化というキーワードで整理し、以下の 2 点に着目した。

- ・電力系統の安定化：有効電力の需給バランスによる周波数安定化と無効電力による電圧補償
- ・これを実現するには蓄電要素が不可欠

現在の蓄電要素の主流はバッテリーである。バッテリーには繰り返し充放電に伴う性能劣化問題があり、高性能バッテリーにはレアメタルを使用することから、恒常的使用および大量普及は難しいと予測している。

そこで、蓄電要素として、レアメタルを使用せず、劣化の影響が非常に小さい電気二重層コンデンサ (EDLC) に注目した。EDLC はバッテリーよりエネルギー密度が小さい、耐電圧が非常に低いという問題があり、この対策が必要であることは明らかである。

2. 研究の目的

東日本大震災以降、再生可能エネルギー利用発電などの小規模かつ大量の分散電源の導入が検討されているが、以下の問題の懸念もある。

- ・系統電力不安定化
- ・発電電力の不安定性

本研究はこれらの課題を解決すべく、以下の項目に重点を置き、検討を行う。

- ・低圧大電流出力ソフトスイッチング電力変換器 (SS-Conv.) による最大電力点追従制御および並列大容量コンデンサへの充放電管理制御
- ・並列多重高周波電流形インバータの導入による系統電力安定化制御
- ・並列大容量コンデンサによる無効電力制御および発電電力の平滑化の効果検証

3. 研究の方法

本研究課題では、以下の方法により、課題の克服を目指した。

- (1) 低電圧大電流出力 SS-Conv. の制御アルゴリズムの確立および実機試作

本研究課題で取り扱う SS-Conv. のベースとなる新しい SS 回路を考案し、下記 (2)、(3) の検討結果も踏まえながら再生可能エネルギー用 SS-Conv. として主回路の改良および制御アルゴリズムの確立、実機試作を行った。

- (2) SS-Conv. に適した MPPT 制御法の確立
PVG および WG 向け SS-Conv. は、以下の制約条件を満足する必要がある。

- ・気象条件による発電電力変動にともなう端子電圧や出力電流変動を許容
- ・電力回生不可
- ・MPPT 実現のため、PVG や WG の電流は連続かつ一定に制御可能

つまり多くの従来 SS 回路で用いられた電流もしくは電圧クランプ方式は適用できない。SS の実現条件も気象条件によって変動する。この点も考慮しながら SS-Conv. の改良を行った。一方、MPPT は山登り法が一般的であるが、高速応答実現のため、太陽電池特性の傾き検出による方法、電流のスイッチング脈動を利用した方法などを考案してきた。本研究課題では、これまでの成果を踏まえ、SS-Conv. 独特の現象に基づいた MPPT 制御の確立を目指した。

- (3) 並列多重高周波電流形インバータの試作・評価

1 台の CSI における昇圧比と波形ひずみの関係および EDLC 電圧と系統電圧の昇圧比から CSI の必要台数を算出し、さらに並列多重 CSI による出力制御法のみならず、波形ひずみの抑制アルゴリズムの確立を目指した。

- (4) 簡易系統模擬ミニモデルの実機試作

逆潮流による電圧変動および需給アンバランスによる周波数変動を模擬する分布定数回路ネットワークおよび小型永久磁石発電機による簡易系統模擬ミニモデルを、応募者が開発した回路シミュレータを使用して、まずシミュレーションによりモデル化し、電圧変動や周波数変動が模擬できる最小構成規模についても検討を行った。

4. 研究成果

全体システム構成を図 1 に示す。本研究課題における研究成果を 3. で述べた項目ごとにまとめる。

- (1) 低電圧大電流出力 SS-Conv. の制御アルゴリズムの確立および実機試作

図2にSS-Conv.の回路構成を示す。EDLCの耐圧を考慮し、降圧チョッパをベースとした。ソフトスイッチングを実現するため、2つのダイオード D_{sub1} および D_{sub2} 、共振コンデンサ C_0 、共振リアクトル L_0 、 C_0 の過充電防止のためのリアクトル L_F を追加した。図3に主スイッチ S_M の電圧 V_{sw} および電流 I_{sw} の実測波形例を示す。スイッチ S_{sub} も同様の波形である。この波形より、SS-Conv.はソフトスイッチング動作を実現したことが明らかとなった。図4は実験によるSS-Conv.の効率特性である。デューティ比0.7以上で効率90%以上を実現した。

なお、デューティ比0.5において効率が

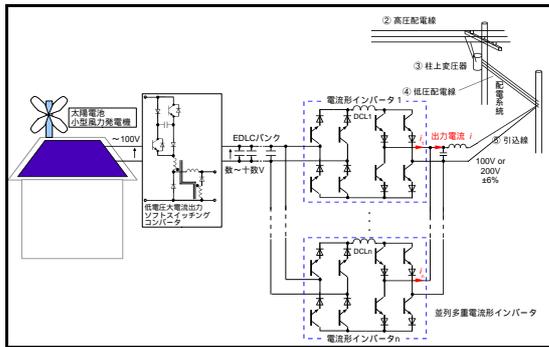


図1：全体システム

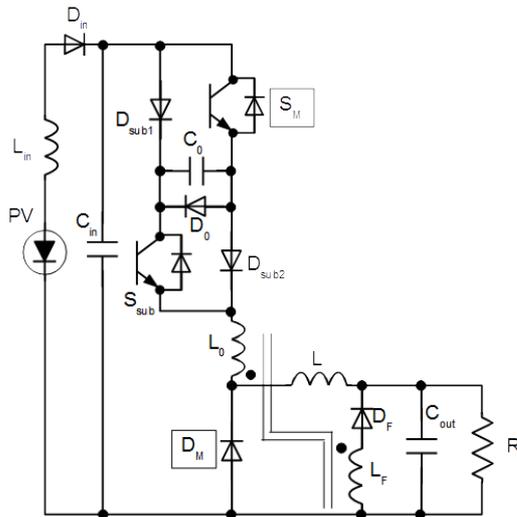


図2：SS-Conv.の回路構成

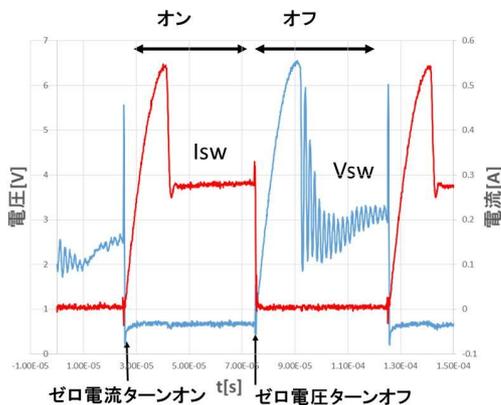


図3：SS-Conv.のスイッチング波形の例 (デューティ比0.5, 実験結果)

低下する原因については現在究明中である。

(2) SS-Conv.に適したMPPT制御法の確立

図5および図6にシミュレーションによるMPPT結果を示す。図5はPVパネル温度を300K一定として、時刻0.05secにおいて日射量を 1kW/m^2 から 0.5kW/m^2 に低下させた場合、図6は日射量を 1kW/m^2 一定として、時刻0.05secにおいてPVパネル温度を300Kから290Kに低下させた場合である。いずれの場合も発電電力は最大電力点電力に追従しており、良好な結果が得られた。

(3) 並列多重高周波電流形インバータの試作・評価

図7は並列多重高周波電流形インバータの回路構成である。入力EDLCの蓄電電力であるため、高昇圧比を要する。したがって、系統連系のためには最適な並列台数を検討する必要がある。

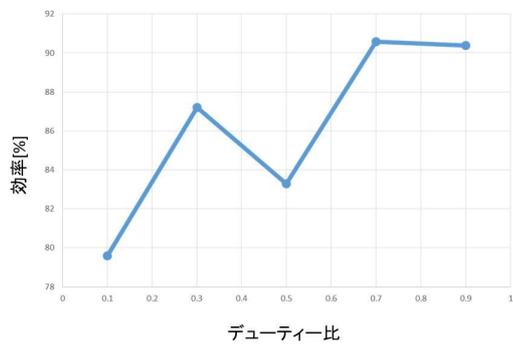


図4：SS-Conv.の効率特性 (実験結果)

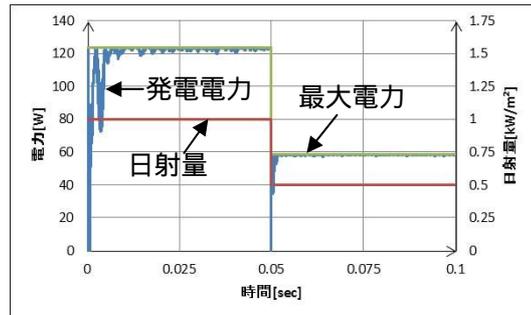


図5：SS-Conv.によるMPPT結果の例 (照度変化時,シミュレーション結果)

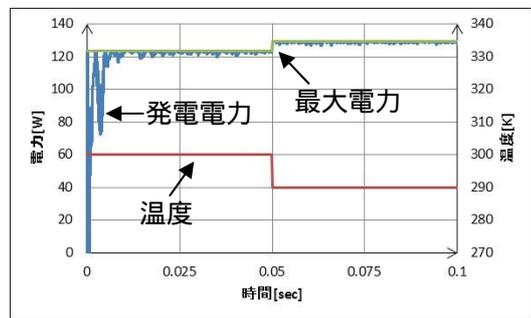


図6：SS-Conv.によるMPPT結果の例 (温度変化時:シミュレーション結果)

図 8 に並列多重高周波電流形インバータの並列台数に対する出力電圧実効値の特性を示す。配電系統に連系するには少なくとも 100V を超える必要があることから、最適並列台数は 8 台と試算した。

(4) 簡易系統模擬ミニモデルの実機試作

図 9 は柱状変圧器より下位の配電系統モデルの例を示す。将来的な太陽光発電の大量普及を視野に入れ、すべての家庭に太陽光発電を設置することを想定した。図 10 は売電による電圧上昇および系統への無効電力注入効果を各家庭における受電端電圧で検討した例である。

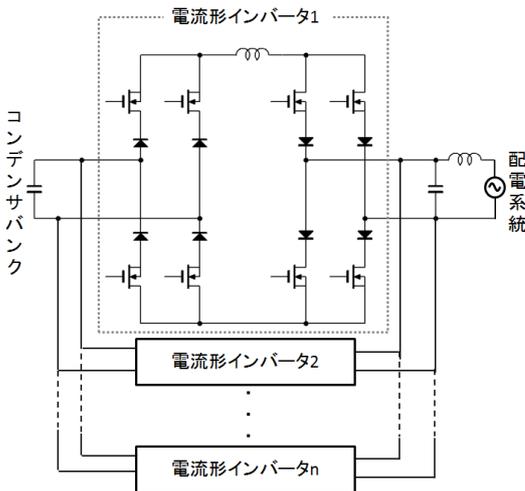


図 7：並列多重高周波電流形インバータ

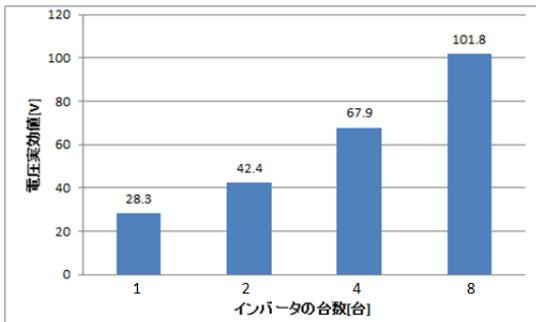


図 8：並列多重高周波電流形インバータの最適並列台数検討結果例

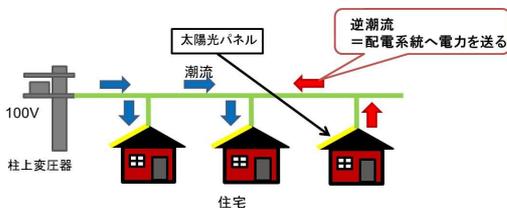


図 9：配電系統モデル

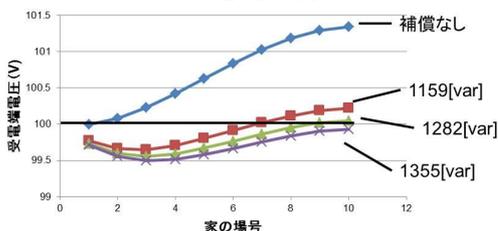


図 10：無効電力による系統電圧補償効果の例

太陽光発電の発電電力をすべて売電した場合 (図中では「補償なし」), 末端で最も電圧が上昇し, 柱状変圧器に近いほど受電端電圧が下がる傾向にある。これに対し, 各家庭において注入する無効電力を均等に負担するとすべての受電端である程度の電圧上昇抑制効果があることが明らかとなった。これにより, 無効電力による系統電圧の安定化制御が可能であり, その負担割合は今後の検討課題である。

この結果を踏まえ, 実機による無効電力制御について検討を行った。図 11 に実験システム構成, 図 12 に無効電力制御結果例を示す。良好な結果が得られているが, 精度向上が今後の課題である。

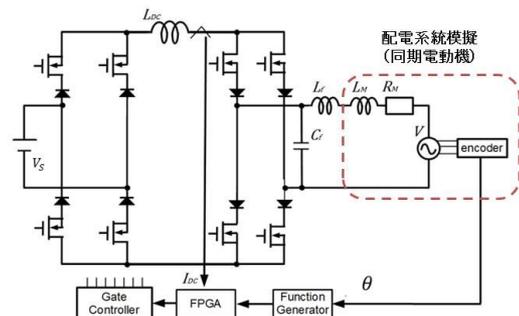


図 11：無効電力制御のための高周波電流形インバータの実験システム構成

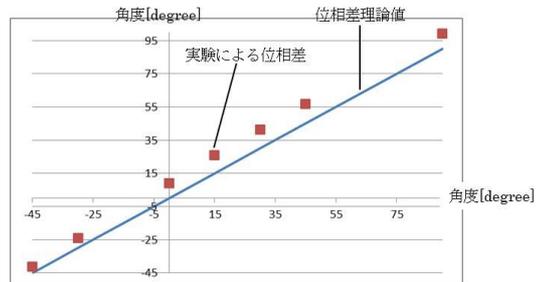


図 12：無効電力制御結果 (実験)

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 0 件)

[学会発表](計 2 件)

- 岩田直樹, 石川裕記, 内藤治夫: 「電流形インバータを用いたスマートグリッドのための力率制御」, 電気学会東海支部若手セミナー「環境対応型次世代パワーエレクトロニクス技術の新展開 第 3 回」, 2015.11.27, 愛知県名古屋市, 中部大学名古屋キャンパス
- 岩田直樹, 石川裕記: 「出力電圧のフィードバック補償による電流形変換器の過渡共振抑制」, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, 2015.9.4, 大分県大分市, 大分大学旦野原キャンパス

[図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 裕記 (ISHIKAWA Hiroki)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90273119

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：