

平成30年6月7日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05929

研究課題名(和文) 常時活用・非常時残存負荷自動分担機能付きマイクログリッド用変換器の開発

研究課題名(英文) Development of Power Converters for Microgrid with Automatic Shutdown and Recover Function of Loads

研究代表者

船渡 寛人 (Funato, Hirohito)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60272217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：災害時には最低限度の機能を維持して、常時には高品質の電力を供給することが可能な「常時活用・非常時残存」機能を有したマイクログリッドの開発を行った。マイクログリッドの実現に当たっては、分散電源との親和性が良い直流配電を採用した。本研究でコンセプトを実現するために、負荷自動分担機能の実現について需給バランスが厳しくなると優先度の低い負荷から自動的に解列し、供給量が回復した場合に復旧する方法を提案した。太陽光発電や蓄電池用電力変換器として太陽光発電用最大電力点追従制御を適用した上で4種類の新しい高昇圧比コンバータ、3種類の直流交流変換器を提案して、それぞれ特徴に応じた選択を可能とした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is development of a new dc microgrid system. A concept of this system is “to use as much as possible in usual” and “to maintain minimum function in emergency”. In the proposed system, dc distribution system is employed because a lot of distributed generation system is dc source. In order to realize this concept, automatic shutdown and recover function of loads is proposed. In this concept, low-priority load is automatically disconnected from grid when power source is not enough, while disconnected load is automatically connected when power source is recovered. Four types of new step-up dc-dc converters suitable for photovoltaic generation and battery storage system are proposed with new maximum power point tracking control. In addition, three types of dc-ac converters suitable for interconnection between the proposed grid and commercial grid are proposed in order to realize more efficient microgrid.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：直流マイクログリッド droop制御 高昇圧比 負荷遮断

1. 研究開始当初の背景

大震災以降、災害時の地域エネルギー確保のためにエネルギーの地産地消が注目されている。地域エネルギーとしては、太陽光発電、風力発電、マイクロ水力発電、地熱発電、バイオマス発電など分散電源が主力となる。分散電源の特徴として、以下の点が知られている。

- 発電電力が小規模かつ不安定である。
- 出力の形態（直流・交流の別、電圧の大きさ等）が千差万別である。

このような分散電源を直接商用電力系統に接続する方法もあるが、商用電源停電時には分散電源も運転を停止する必要がある。災害時の地域エネルギー確保のためには、地域の負荷と分散電源を商用電力系統は別に接続するマイクログリッドが有効である(図1)。

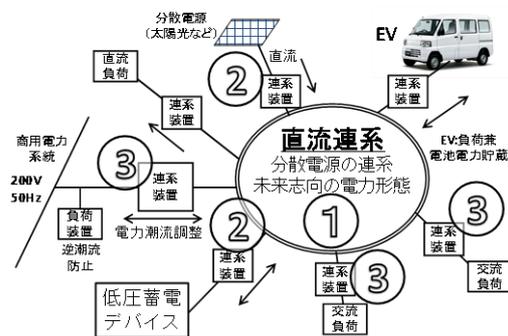


図1 マイクログリッドの各要素

マイクログリッドは、図1のように分散電源・地域負荷・蓄電装置・商用系統連系装置で構成される。全体の制御と各装置において以下のような問題点が存在する。

1. 自立運転時の需給バランスの問題
需給バランスが崩れると、電力供給が全面的に不可能となる。特に、自立運転時は「電源+蓄電」容量が限定されるので、バランスが崩れやすく、全停電に陥る。
2. 電力変換による損失
図のように多段の電力変換を経るため、変換損失が問題となる。
3. 発電蓄電装置の問題
太陽電池や蓄電機器（リチウムイオン電池など）は高コスト、かつ一要素が低電圧なので多段直列する必要がある。バランス制御などが必要となり、複雑かつ高コストとなる。

2. 研究の目的

宇都宮大学工学研究科の分野横断プロジェクトとして、“zero design project”が立ち上がっている。その基本コンセプトは「常時活用・非常時残存」である。このコンセプトを基本に、前述の問題を解決できる負荷自動分担機能を有するマイクログリッド用電力変換器を提案することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 負荷自動分担機能の実現

マイクログリッドの柔軟な運用を可能とする「負荷自動分担制御」は、各負荷に接続される連系変換器の電源側機能として実装する。各負荷と電源、蓄電装置が、系統の電圧情報だけで自律的に分担する droop 制御を基本とする。そこに、電圧レベルに応じて負荷の優先順位を付けて自動的に分担制御を行う方法を研究する。

(2) 未来志向の直流連系

太陽電池をはじめとする分散電源は直流出力が多い。電気器具も、内部は直流で動作するものが多い。そこで、直流連系を採用する。直流は電圧の大きさだけが合えば連系できるので、負荷自動分担制御が容易に実現できる。

(3) 高昇圧比コンバータ

太陽電池や蓄電池は単位要素（セル）の電圧が低いものが多い。自動車用蓄電池は12Vや24Vが標準電圧となっている。例えば24Vから350V程度（直流配電に必要な電圧）まで直接昇圧できれば、安価な汎用蓄電池を活用できる。そのために、スイッチトインダクタを用いた高昇圧比コンバータを開発する。図2に示す回路は、新しく提案する回路の一方であり、他にも数種類のコンバータを比較検討して用途に応じた最適なコンバータを選択する。また、太陽光発電においては日射量に応じて太陽電池を最大電力点で動作させる最大電力点追従制御(Maximum Power Point Tracking, MPPT)をコンバータに実装することが必須である。回路の応じたMPPTの実装も検討する。

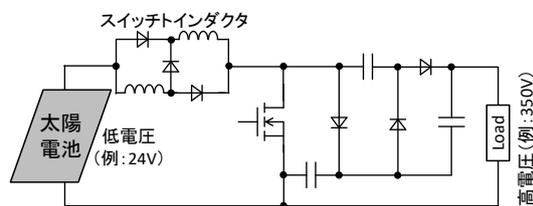


図2 スwitchトインダクタを用いた高昇圧比コンバータ

(4) 交流連系

市販機器は交流駆動も多いので、交流機器駆動用インバータとして、高昇圧比コンバータを組み合わせた新しいインバータを提案する。

4. 研究成果

(1) 負荷自動分担機能付直流連系

Zero design project のコンセプトである「常時活用・非常時残存」を実現できるマイクログリッドを UU グリッドと呼び、実験検証用ミニモデルの構築を目指した。マイクログリッドの仕様としては、複数の発電装置、複数の蓄電装置と複数の負荷を持ち直流で連系することとした。電力供給と需要のバランスを自律的に取るために、良く知られている droop 制御という手法を用いた。Droop 制

御では複数の蓄電装置が電圧を決定するが、出力に応じて電圧を変動させる垂下特性を持たせているため自律的に需給バランスが取れる電圧に落ち着く。

本研究では、droop 制御の考え方を元に、需要が発電能力を超えてしまった場合に負荷の優先度に応じて負荷を遮断し、供給能力が回復した場合に自動的に負荷を復旧する制御を提案した。検討対象としては、図3に示す太陽光発電装置およびバッテリーユニット各1台と負荷2台の最もシンプルな構成のマイクログリッドを用いた。図4に提案法を適用した負荷遮断および復旧動作のシミュレーション波形を示す。本シミュレーションはシミュレーション結果である。図では上から順に、直流バス電圧、日射量、太陽光ユニット出力電力、バッテリーユニット出力電力と負荷の消費電力である。図より、日射量が減少に伴いバッテリーの出力電流が大きくなりバス電圧が低くなる。点線Aでバス電圧が95V(低優先度遮断閾値電圧)になり低優先度負荷が遮断されている。さらに、点線Bで高優先度も遮断される。また、日射量が0W/m²から徐々に増加すると、バッテリーが吸収する電力が増えていくことでバス電圧が高くなる。点線Cではバス電圧が106V(高優先度復旧閾値電圧)になり高優先度負荷から復旧し、点線Dで低優先度負荷も復旧しており、適切に遮断復旧が行えていることが確認できた。

また、本研究ではバッテリーユニットに使用するDC/DCコンバータの出力キャパシタと負荷遮断時の電圧変動の関係から、負荷の遮

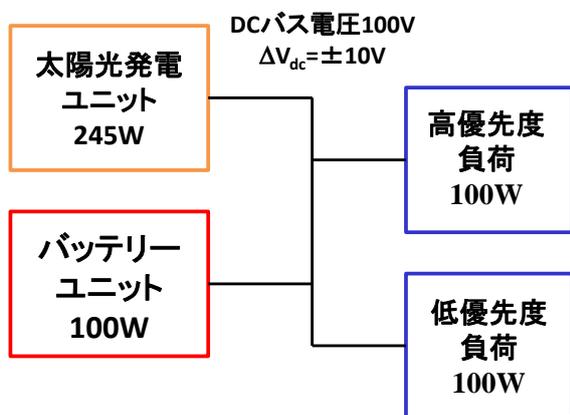


図3 DCマイクログリッドの構成

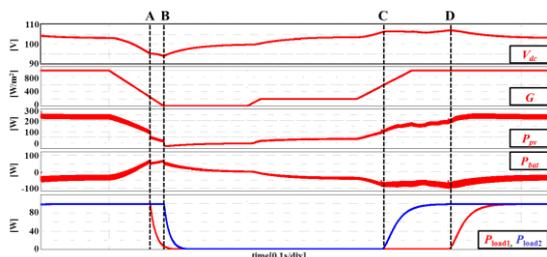


図4 負荷遮断復旧の動作検証

断復旧動作が適切に行うことが可能な出力キャパシタの設計法を提案した。

(2) 高昇圧比コンバータ

昇圧回路について高効率で高昇圧比を実現可能な回路を4種類提案した。1枚の太陽電池パネルの出力電圧は30V程度であるため、太陽電池パネル毎に電力変換を行うマイクロインバータでは交流200Vや直流300Vに連系するために10倍程度の昇圧機能を有する必要がある。従来の太陽光発電連系装置であるPCSにも昇圧機能を有する回路が搭載されているが、数倍以上の昇圧を行うと極端に効率が落ちるという欠点がある。本研究では、昇圧比10倍程度でも実用的な効率を得ることを目的として4種類の新しい高昇圧比変換回路を提案した。1つはスイッチトインダクタモジュールを基本としたSwitched Inductor Quadratic Boost Converter (SIQBC)である。他の3つはCockcroft-Walton Voltage Multiplier (CWVM)と昇圧コンバータの組み合わせで実現した。CWVMとの組み合わせ回路としては、第一にスイッチトインダクタコンバータとの組み合わせであるSwitched Inductor with CW Voltage Multiplier (SIVM)、第二にスイッチトインダクタの変形コンバータとの組み合わせであるHigh Gain converter with CW Voltage Multiplier (HGVM)、第三にZソースコンバータとの組み合わせであるZ Source with Voltage Multiplier (ZSVM)を提案した。それぞれに得失が存在するが、昇圧比と効率について理論検討を加えた上で実験検証を行った。その結果、最も昇圧比が高い回路はSIQBCであるが効率が他の回路と比べて劣る、効率面ではHGVMが有利である、ZSVMは入力電流リップルが小さい、という特長が見いだされ、重要視する項目によって回路を選定することが可能であることを明らかとした。

(3) MPPT制御

MPPT制御に求められている性能は、速く最大電力点に到達し、かつ最大電力点で動作点が安定することである。本研究では増分コンダクタンス法をベースとした2つの制御を提案した。第一に、モデル予測制御を適用した制御法である。モデル予測制御は直感的に理解しやすく、スイッチのオンオフで制御される電力変換回路との親和性が高い。しかし、モデルの精度によって制御性能が決まるためモデル作成が課題となる。本研究では、提案しているSIQBCへの実装を前提として回路モデルを生成した。また、スイッチング周波数が変化するとフィルタの設計が困難となるため、スイッチング周波数が固定となるモデル予測制御を適用した。第二の方法はヒステリシス制御を用いた方法である。ヒステリシス制御もシンプルで追従性の高い制御法として知られるが、通常はスイッチング周波数が変化するためスイッチング周波数が固定となる可変ヒステリシスバンド制御を適

用した。いずれの方法でも、増分コンダクタンス法で生成された基準電流に対して提案した電流制御を実装した。両者とも、従来の電流制御を適用した方法と比較して十分に速い応答を得ることができた。

(4) 交流連系装置

直流交流変換回路については系統側の電圧に追従するため、正弦波追従電流制御が必要である。特にマイクログリッド用いる小容量太陽光発電装置用マイクロインバータでは単相交流を出力する必要があるため、座標変換を用いることが可能である三相電流制御と比較すると定常誤差が発生しやすい。本研究では高効率な回路として5スイッチインバータ、3スイッチインバータ、Tタイプ3レベルインバータの3種類の電力変換回路について検討した。いずれの回路も他の用途での使用実績があるが、広く用いられている4スイッチHブリッジ回路と比較して高効率化が期待される。本研究ではマイクロインバータに適した制御法として追従性の高いモデル予測制御を用いた電流制御を適用した。その結果、3種類の方式について1ms以下の高速な応答を得ることができた。

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4件)

①Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “A Comprehensive Study of Three High Gain DC-DC Topologies Based on Cockcroft-Walton Voltage-Multiplier for reduced Power PV Applications”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (TEEE D), Vol. 13, No. 4, pp. 642-651, (2018. 4) DOI:10.1002/tee.22611

②Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “An Efficient and High-gain Inverter Based on The 3S Inverter employs Model Predictive Control for PV applications”, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 1484-1494, (2017. 7)

③Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “Grid-connected boost inverter for low-power PV applications with model predictive control”, IET The Journal of Engineering, Published online, DOI 10.1049/joe.2017.0070, pp. 318-326, (2017. 6)

④Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “Novel Predictive Maximum power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Applications”, Journal

of Power Electronics, Vol. 16, No. 1, pp. 277-286, (2016. 1)

[学会発表] (計10件)

①主濱大裕, 竹内政人, 鈴木貴史, 池田雅一, 船渡寛人, 春名順之介: 「DC マイクログリッド用チョップパの設計製作」, 電気学会東京支部 栃木・群馬支所 合同研究発表会, ETT-18-9, ETG-18-9, (2018. 3)

②竹内政人, 池田雅一, 船渡寛人, 春名順之介: 「DC マイクログリッドのシステム設計と実験検証」, 電気学会東京支部 栃木・群馬支所 合同研究発表会, ETT-18-24, ETG-18-24, (2018. 3)

③鈴木貴史, 船渡寛人, 春名順之介: 「スイッチドインダクタを用いた双方向 DCDC コンバータの損失解析」, 電気学会東京支部 栃木・群馬支所 合同研究発表会, ETT-18-54, ETG-18-54, (2018. 3)

④池田雅一, 竹内政人, 船渡寛人, 春名順之介: 「DC マイクログリッドにおける負荷遮断を含めたシステム制御方式の検討」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, Y-51, vol. Y, p. 51, (2017. 8) 函館

⑤ Omar Abdel-Rahim, Masato Takeuchi, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna “T-Type Three-Level Neutral Point Clamped Inverter with Model Predictive Control for Grid Connected Photovoltaic Applications”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), Papar No. LS1A4, In electric 5pages, in Chiba, Japan (2016. 11)

⑥Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “Droop Method Based on Model Predictive Control for DC Microgrid”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), Papar No. DS6G-4-4, In electric 6pages, in Chiba, Japan (2016. 11)

⑦Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “High Gain Inverter based on the 3S Inverter with Model Predictive Control for PV Applications”, 18th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE2016) ECCE Europe, Online, 6 pages, in Karlsruhe, Germany (2016. 9)

⑧陳震, 鈴木貴史, 船渡寛人, 春名順之介: 「D-EPC を用いたハイブリッド蓄電装置用電力変換器の提案」, 平成 28 年電気学会全国大会, 4-110, vol. 4, pp. 188-188, (2016. 3) 仙

台市東北大学

⑨Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, and Junnosuke Haruna, “An Efficient MPPT technique with Fixed Frequency Finite-set Model Predictive Control”, 2015 IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE2015), pp. 6444-6449, in Montreal, Canada (2015.9)

⑩Omar Abdel-Rahim, Hirohito Funato, “An Experimental Investigation of Modified Predictive Hysteresis Control Based MPPT Strategy For PV Applications”, 2015 IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE2015), pp. 6450-6454, in Montreal, Canada (2015.9)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船渡 寛人 (FUNATO, Hirohito)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60272217

(2) 研究分担者

春名 順之介 (HARUNA, Junnosuke)

宇都宮大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40609369