

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420223

研究課題名(和文) マルチレベル変換器を用いた革新的風力発電システムの研究

研究課題名(英文) Study of next-generation wind turbine generation systems based on multilevel converters

研究代表者

萩原 誠 (Hagiwara, Makoto)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：20436710

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)：本研究では、近い将来の実用化が期待される10 MW級風力発電システムへの適用を想定し、新しい半導体電力変換器に関して検討を行った。具体的には、次世代マルチレベル変換器であるモジュラー・マルチレベル変換器を用いた風力発電システムに関して「PSCAD」を用いたシミュレーション、およびミニモデルを用いた実験検証により動作原理や制御法の妥当性を確認した。また、インダクタの小型・軽量化が実現可能な新しい非絶縁形DC-DC変換器を提案した。提案したDC-DC変換器は補助変換器を用いることで、インダクタに印加されるリップル電圧を低減する点に特長がある。回路の妥当性は実験とシミュレーションにより確認した。

研究成果の概要(英文)：The generator voltage of a cutting-edge wind turbine generation system (WTGS) is expected to increase from the conventional low-voltage level of 690 V to a medium-voltage level of 6.6 kV with a power level up to 10 MW without the application of a parallel connection of multiple power units. This research project proposed a 10-MW WTGS consisting of a three-phase open-winding synchronous generator equipped with six lead terminals and three modular multilevel converters (MMCs) which are identical in terms of circuit configuration. The validity of the system has been confirmed by computer simulation using PSCAD software package along with experiment using a down-scaled system. Moreover, this research projects has proposed a new non-isolated dc-dc converter which can achieve reduction in size and weight of an inductor. The validity of the new dc-dc converter has been confirmed by a 150 V down-scaled system and computer simulation using PSCAD software package.

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 風力発電 双方向チョッパ マルチレベル変換器

1. 研究開始当初の背景

地球資源の有効利用や地球温暖化防止の観点から、風力発電の大量導入が期待されている。特にタービンを海上に設置する洋上風力発電は、陸上風力発電と比較し豊富な資源量を有することから、四方を海に囲まれた日本において再生可能エネルギーの柱として大量導入が期待されている。風力発電に適用される各種発電機方式の中で、永久磁石式多極同期発電機(PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator)は 1) 増速ギア・スリップリングが除去可能、2) 低故障率、3) 注油作業等のメンテナンスが不要といった特長から、現在 2 MW(メガワット)以上の大容量風力発電の主流となりつつある。

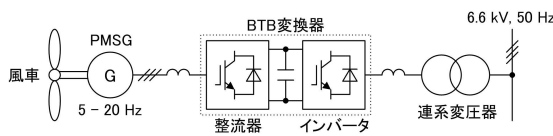


図 1 従来型風力発電システムの構成例

発電機の回転数(周波数)は風量に応じて変化するため、系統(電力会社)と連系(接続)する際に半導体電力変換技術(パワーエレクトロニクス)の適用が必要不可欠である。図 1 に、PMSG を用いた従来型風力発電システムの構成例を示す。発電機は、BTB(back-to-back)と呼ばれる半導体電力変換器を介して系統と連系する。BTB は発電機交流電圧を一定の直流電圧に変換する PWM(Pulse Width Modulation)整流器(パルス幅変調を適用した整流器)と、系統と同期した交流電圧に再変換する PWM インバータにより構成する。2 台の PWM 変換器を用いるため、装置の低効率化・高コスト化が問題となる。また、一般的な 2 レベル変換器を用いた BTB の場合、素子耐圧の関係から連系変圧器が必要となる。しかし、連系変圧器の使用は装置の大型化・高重量化の一因となる。また、風力発電システムでは、直流電圧を別の直流電圧に変換する DC-DC コンバータ(双方向チョッパ回路)が適用される場合が多い。しかし、双方向チョッパ回路に使用するインダクタがシステムの大型化・高重量化を引き起こすという問題点が存在した。

風力発電システムの小型・軽量化・高効率化・低コスト化を実現するためには、図 1 において 1) 連系変圧器の除去、2) ダイオード整流器(高効率・高信頼性・低コスト)の適用が必要不可欠である。連系変圧器を除去する場合、インバータは高圧系統と直結する必要があり、この場合インバータの高圧化が求められる。一方、PWM 整流器をダイオード整流器に置き換えた場合、図 1 の直流リンク電圧が風量に応じて変動するという問題が発生する。インバータは、直流電圧が変動した場合においても一定の交流電圧を出力する

ことが求められる。一般的な 2 レベル変換器は直流電圧と交流電圧が相互に干渉するため、上記 2 点を同時に満足することは不可能だった。

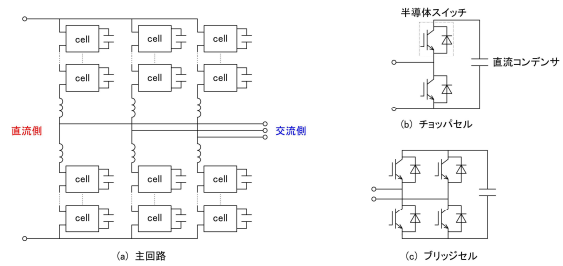


図 2 モジュラー・マルチレベル変換器の構成

このような背景の下、変圧器を用いずに高圧化・大容量化が可能なモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)が次世代型電力変換器として注目を集めている。図 2 に MMC の回路構成を示す。MMC は変換器各アームをモジュールで構成する点に特長があり、各モジュールは単位セルのカスケード接続により構成する。MMC は、図 2(b)に示すチョッパセルを適用した「**チョッパセル形 MMC**」、図 2(c)に示すブリッジセルを適用した「**ブリッジセル形 MMC**」に大別できる。

研究開始当初、世界中で MMC に関する研究・開発が行われていたが、チョッパセル形 MMC に関する検討が大半であり、ブリッジセル形 MMC に着目する研究グループは少なかった。これは、チョッパセルが 2 個の半導体スイッチを必要とするのに対して、ブリッジセルは倍の 4 個を必要とするためである。しかし、チョッパセル形 MMC を用いた場合、MMC の直流電圧と交流電圧が相互に干渉するため、上述の 2 条件を同時に満足することはできないという問題点が存在した。一方、ブリッジセル形 MMC は、直流電圧に依存しない交流電圧を出力可能であり、上述の 2 条件を同時に満足できる。また、研究開始当初は MMC 単体の検討を行っている研究グループは存在したが、MMC の風力発電システムへの応用に関しては未検討であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MMC の技術を適用した小型・軽量化が実現可能な新しい風力発電システムの提案・検討を行うことである。上記目的を達成するため、具体的に下記 2 項目に関して検討を行った。

- ブリッジセル形 MMC を用いた風力発電システムの検討
- 風力発電システムに使用する非絶縁型 DC-DC コンバータの小型・軽量化に関する検討

(1)ブリッジセル形 MMC を用いた風力発電システムの検討

ブリッジセル形 MMC を風力発電システムに適用する場合、素子耐圧と高調波電圧抑制の観点から、アーム毎のブリッジセル数は 4 個以上になることが想定される。そこで本研究では、アーム毎に 4 個以上のブリッジセルを有する MMC の検討を行い、より実機に近い状況下で下記課題を検証することを主目的とする。

6.6 kV ,10 MW 実機モデルの動作検証

実際の風力発電システムにブリッジセル形 MMC を適用する場合、変換器容量は最大 10 MW 程度、定格電圧は 6.6 kV 程度が想定される。そこで本研究では、シミュレーションによる 6.6 kV , 10 MW 実機モデルの動作検証を行った。

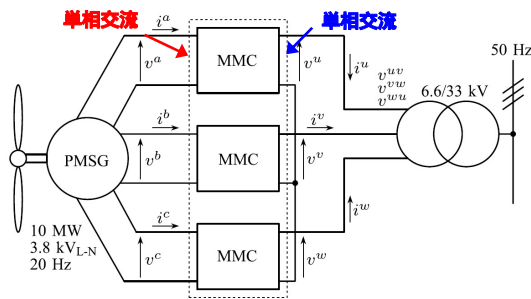


図3 提案する風力発電システムの構成

図3に、本研究で提案した風力発電システムの構成を示す。発電機(PMSG)各相の単相交流電圧を、MMCを用いて異なる周波数・振幅を有する単相電圧に直接変換する点に特長がある。MMCの定格容量は発電機容量の1/3となるため、変換器容量が低減できる。本研究では、図3の妥当性をPSCADを用いたコンピュータシミュレーションにより確認した。

制御法とモデリング手法の確立

MMCは各セルに用いる直流コンデンサ電圧を一定に制御する必要があるが、ブリッジセル形MMCの制御法は現在まで確立されていない。一方、最適制御ゲインを選定するには高精度モデリングが必要不可欠だが、MMCは回路が複雑であるため、高精度モデリングに成功した研究グループは国内外含めて存在しない。そこで本研究では、最適制御法の提案と高精度モデリング手法の確立を実現する。

(2) 風力発電システムに使用する非絶縁形 DC-DC コンバータの小型・軽量化に関する検討

る検討

高圧の非絶縁形 DC-DC コンバータは、パワーデバイスのスイッチング周波数を 1 kHz 以下に設定する。その結果、DC-DC コンバータに使用するインダクタが大型化・高重量化するという問題点が存在した。

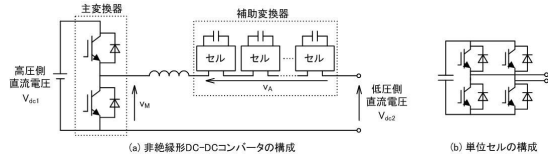


図4 提案する DC-DC コンバータの構成

図4(a)に、本研究で検討する非絶縁形 DC-DC コンバータの主回路構成を示す。主回路は、主変換器、補助変換器、インダクタにより構成し、主変換器は双方向チョップと等価である。補助変換器は、図4(b)に示す単位セル(単相フルブリッジ変換器)のカスケード接続により構成する。図4の動作は、主変換器と補助変換器が同量の交流電圧を出力する点に特長がある。その結果、インダクタに印加される交流電圧が理想的に零となるため、従来型 DC-DC コンバータと比較しインダクタンス値を大幅に低減できる。本研究では、上記回路の動作原理の確立と 150 V ミニモデルによる動作検証を行うことを主目的とする。

3. 研究の方法

研究はミニモデルを用いた実験検証、PSCADを用いたコンピュータシミュレーション、理論解析の3通りの手法を用いて行った。ブリッジセル形 MMC を用いた風力発電システムの検討では、主にシミュレーションによる検討を行ったが、図3における単位 MMC に関しては、ミニモデルを用いた実験検証を行った。風力発電システムに関しては、実際の 5 MW 級風力タービンのパラメータをシミュレーションに取り込むことで、より実際に近いモデルの確立を試みた。

DC-DC コンバータに関しては、研究開始当初動作原理が確立されていなかったため、始めはシミュレーションと理論の両面から動作原理検証を行った。その結果、安定動作に必要な不可欠な直流電圧制御法、インダクタ電流制御法を確立した。その後、150 V ミニモデルを用いた実験検証を行うことで、シミュレーションと実験の有用性・妥当性を確認した。

4. 研究成果

(1)ブリッジセル形 MMC を用いた風力発電システムの検討

始めに、図3の単位MMCの基礎実験を行った。上記MMCは単相交流を直接別の単相交流に変換する点に特長がある。実験は、200V、6kWミニモデルを用いて行った。図5に、実験に用いた回路構成を示す。図6に、20Hzの単相電圧を50Hzの単相電圧に変換した場合の実験波形を示す。

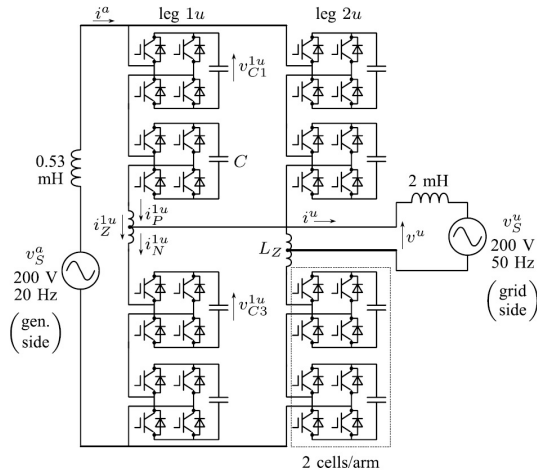


図5 実験に用いた単相-単相電力変換器の回路構成

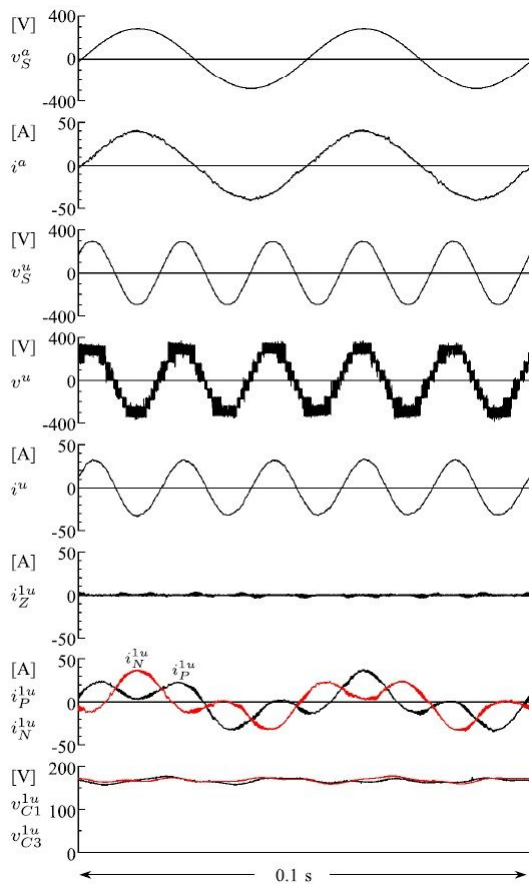


図6 6 kW 送電時の実験波形

各電圧・電流は、図5における各電圧・電流に対応している。20 Hz 側と 50 Hz 側ともに電流波形は正弦波状になっており、MMC によ

る高調波成分低減効果が確認できる。また、各直流コンデンサ電圧も良好に指令値に追従している。また、図6と同条件のシミュレーションを行った結果、波形が細部に至るまで詳細に一致することを確認した。

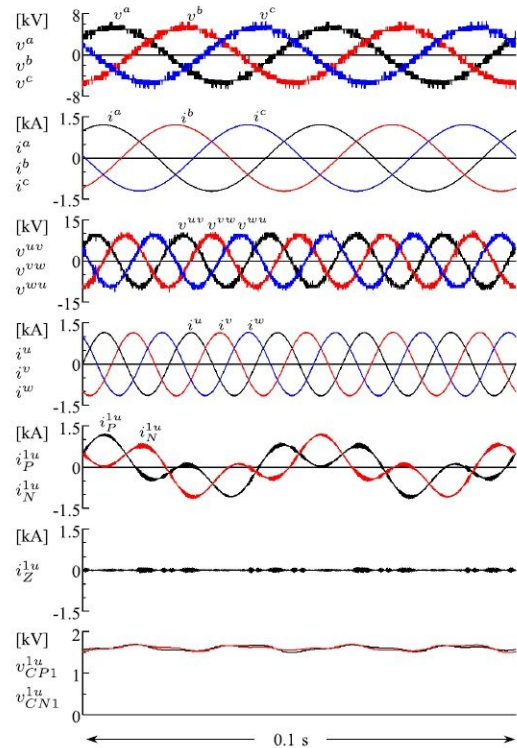


図7 図3のシミュレーション波形

図7に、図3のシミュレーション波形（10 MW 送電時）を示す。図7のシミュレーション波形と図6の実験波形を比較すると、両者は良好に一致している。図7は定常特性に関する波形だが、始動特性についても同様に検討を行い、良好な始動特性が得られることを確認した。

(2) 風力発電システムに使用する非絶縁型 DC-DC コンバータの小型・軽量化に関する検討

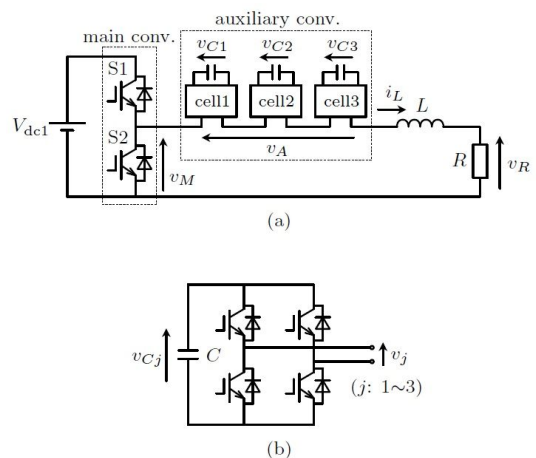


図8 実験に用いた DC-DC コンバータの回路

構成

図 8(a)に、実験に用いた DC-DC コンバータの回路構成を示す。主回路は、主変換器、補助変換器、インダクタより構成する。主変換器において S1 は正側バルブデバイスを、S2 は負側バルブデバイスを表す。補助変換器は、図 8(b)に示す単相フルブリッジ変換器のカスケード接続より構成し、インダクタと抵抗負荷に対して直列に接続した。主変換器のキャリア周波数は 450 Hz、補助変換器のキャリア周波数は 1800 Hz とした。

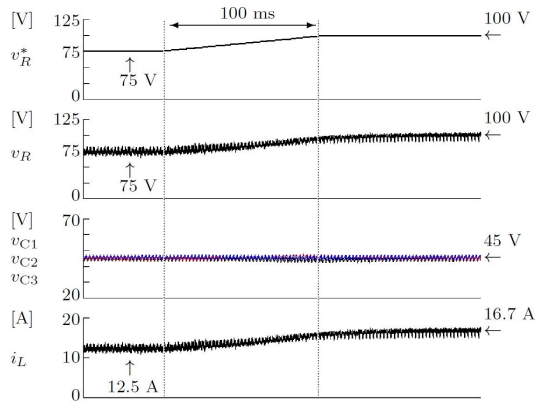


図 9 図 8 の実験波形

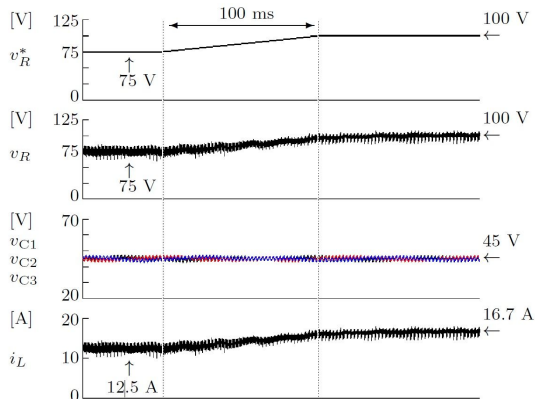


図 10 図 8 のシミュレーション波形

図 9 に図 8 の実験波形を、図 10 に図 8 のシミュレーション波形をそれぞれ示す。各電圧・電流は図 8 の電圧・電流に対応している。実験は負荷電圧の指令値を 75 V から 100 V にランプ関数状に増加させた場合の過渡特性を示している。

図 9 と図 10 より、負荷電圧指令値を急変させた場合においても、過電圧・過電流は生じず、安定した特性を得られることを確認した。

また、理論解析の結果、従来型の DC-DC コンバータ（双方向チョッパ）と比較し、必要なインダクタンス値を 1/65 以下に低減できることを実証した。

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)

N. Thitichaiworakorn, 萩原誠, 赤木泰文, "A Medium-Voltage Large Wind Turbine Generation System Using an AC/AC Modular Multilevel Cascade Converter," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol.4, no. 2, pp. 534-546, pp. 534-546, 2016, 査読有, DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2462119

〔学会発表〕(計 2 件)

大西晴菜, 萩原誠:「インダクタの小型・軽量化が実現可能な双方向チョッパの実験検証」電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 2017 年 1 月 28 日, ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター(大阪府・吹田市)

大西晴菜, 萩原誠:「インダクタの小型・軽量化が実現可能な双方向チョッパの過渡特性」電気学会全国大会, 2017 年 3 月 18 日, 富山大学五福キャンパス(富山県・富山市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 双方向チョッパ回路

発明者: 赤木泰文, 萩原誠

権利者: 赤木泰文, 萩原誠

種類: 特許

番号: 特願 2015-172771

出願年月日: 2015 年 9 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: Bidirectional Chopper Circuit

発明者: Akagi Hirofumi, Hagiwara Makoto

権利者: Akagi Hirofumi, Hagiwara Makoto

種類: 特許

番号: W02017038122 A1

出願年月日: 2017 年 3 月 9 日

国内外の別: 国外

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 誠 (Hagiwara Makoto)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号: 20436710