

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760237

研究課題名(和文) モジュラーマルチレベルコンバータ構成による新しい分散型電源システムの研究

研究課題名(英文) Research on novel distributed generation system configured by modular multilevel converter

研究代表者

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shinichi)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80363472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：系統電圧の高電圧化および安定化を目的とした分散型電源用の新しい電力変換システムとして、モジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)と呼ばれる新しい電力変換器構成の考え方をを用いた系統連系の回路・制御方式について研究を行った。

本研究におけるMMC回路方式について理論的な解析を行い、電力送電とコンデンサ電圧の制御を含めたMMC制御方式を提案した。提案方式について、回路解析ソフトによるシミュレーションを行うことによりその有効性を確認した。さらに実機試験回路の作製及び制御プログラム開発等を行った。実験により提案する制御システムが適正に動作することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I investigated novel circuit and control system of modular multi-level converter (MMC) for high voltage and stable distributed generator. In this research, I performed theoretical analysis and simulation of the proposed MMC control with power flow control and capacitor voltage control. In addition, I developed an experimental system and control programs of the MMC to verify the behavior. I clarified that the proposed MMC system is able to operate properly and stably in simulation and experiment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：マルチレベルコンバータ 系統連系 インバータ 有効電力制御

1. 研究開始当初の背景

将来のエネルギー危機が懸念されている昨今、太陽電池・風力発電・燃料電池等の発電機器による分散型電源の普及が期待されており、またこれらを1つのグループとして統合的に管理・運用するスマートグリッドの考えも注目され、一部離島などでは実証試験も行われ始めている。このスマートグリッド内の送電、または他のスマートグリッド間との電力の送電・受電において重要となるのは系統電圧の高圧化、および電圧歪み率の低減である。高圧化により送電効率の向上を、歪み率の低減により電力品質の向上を図ることができる。

このような機能を持つ電力変換器としてマルチレベル変換器があり、変換器の多段接続による出力のマルチレベル化による高圧化、低歪み化が実現される。しかし、従来考えられているシステム構成は、直列接続の個々の変換器に変圧器が必要であるなど、装置の大型化と重量増加が問題であった。そこで、個々の変換器に変圧器を用いずモジュール化したモジュラーマルチレベルコンバータと呼ばれる新しい構成による変換システムが研究されるようになってきており、様々なシステムへの応用が期待されている。

2. 研究の目的

系統電圧の高電圧化および低歪み化を目的とした分散型電源用の新しい交流/交流送電用の電力変換システムへの応用として、モジュラーマルチレベルコンバータ(MMC: Modular Multi-level Converter)と呼ばれる新しい電力変換器構成を用いた分散型電源の回路・制御方式について研究を行い、MMCの特徴を活かした次世代型の新しい分散型電源システムの開発を目指す。

MMCは汎用の電力変換器を多段接続した回路構成で、複数コンデンサの電圧管理および直流送電の電力平準化制御を行うと同時に、分散型電源として交流系統への電力送電の有効・無効電力制御を行う。これらを統合的に制御する新方式を提案し、理論解析・シミュレーションおよび実験によりその有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究で用いる分散電源システムに適したMMC回路方式として、単相-三相交流変換MMCと三相-三相交流変換MMCの回路方式の動作について理論的に解析し、交流の有効電力・無効電力の電力制御およびコンデンサ電圧制御の制御を含めたMMCの制御方式を提案した。提案の制御手法について回路解析ソフトによりシミュレーション解析を行い、各種条件における制御手法の妥当性を検証した。

さらに、本研究のMMC回路の実験装置の試作を行い、考案した制御方式の実証試験を行い、その有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 単相-三相交流変換MMC回路方式

最初に単相MMC回路(図1)を基にした単相-三相交流変換MMC回路構成の動作と制御方式について理論解析を行った。図2が解析を行ったMMC回路構成で、分散型電源が交流系統へ系統連系接続する状態を想定している。MMCに接続するモジュールはフルブリッジ型と呼ばれる単相インバータ構成の電力変換器で各アームモジュール部分に複数のフルブリッジ回路が多段接続される。

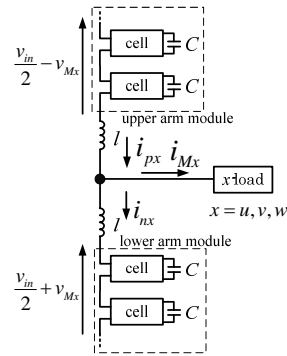


図1 単相 MMC 回路

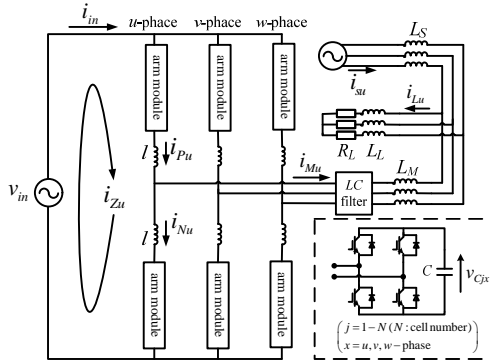


図2 単相-三相交流変換MMC(系統連系時)

図2のMMC回路で入力から供給する電力と系統へ出力する電力およびコンデンサ電圧を保持するための電力のバランスについて理論式を導出し、その式を基にした制御方式を提案した。図3はその制御方式の全体構成図である。

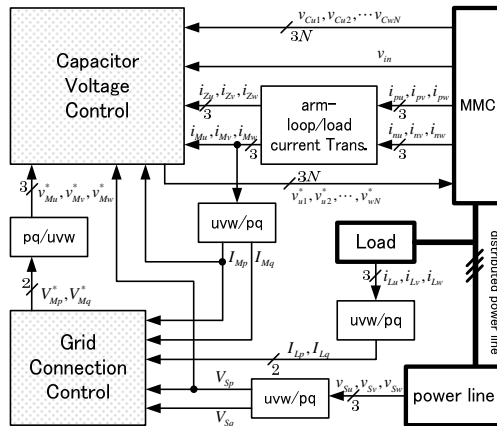


図3 MMCの系統連系制御構成図

図3の制御はコンデンサ電圧制御(Capacitor Voltage Control)と系統の電力制御(Grid Connection Control)の2つの制御で構成される。図3の制御により、モジュールの各コンデンサ電圧を一定に保持しながら、交流系統へ出力する有効電力・無効電力を任意に制御することができる。

本制御方式の動作検証のため、回路解析ソフト(PSIM9.1)を用いてシミュレーションを行った。その結果の一例を図6に示す。

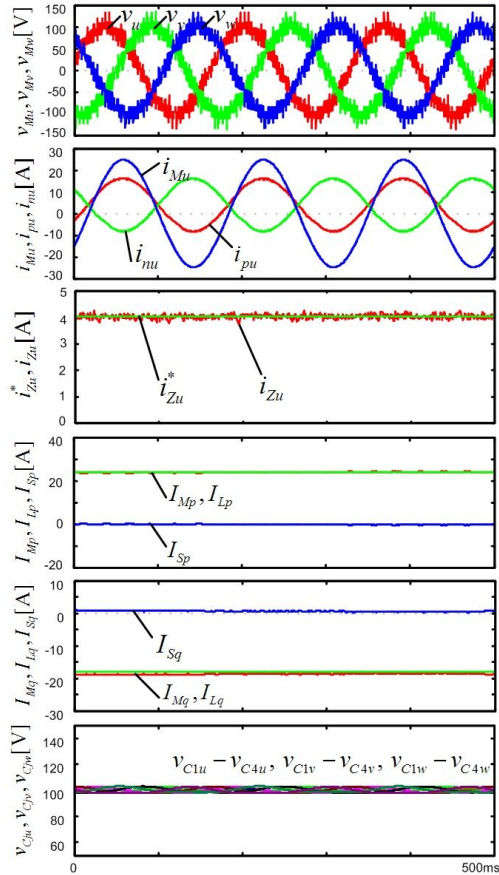


図4 シミュレーション結果  
(単相-三相交流変換 MMC)

図4-1より出力がマルチレベル出力で歪みが少ない正弦波となっている。図4-2~5の各電流は安定に制御されており適正に動作している。また、図4-6のコンデンサ電圧も一定に制御されており、提案した制御方式が正しく動作することが確認された。

## (2) 三相-三相交流変換 MMC 回路方式

(1)の方式を応用・拡張して、三相-三相交流変換 MMC 回路方式の動作と制御方式について理論解析を行った。

図5が三相-三相交流変換 MMC の構成図で、RST 端子が入力(1次側)の三相電源へ接続され、UVW 端子が出力(2次側)の三相回路へ接続される。

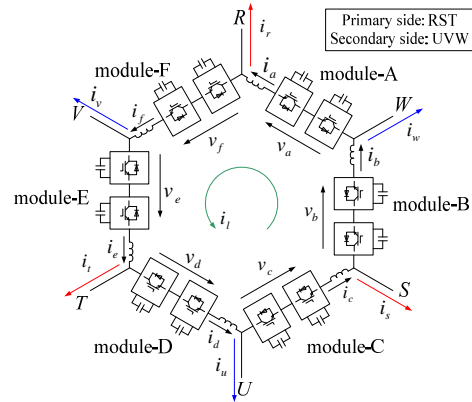


図5 三相-三相交流変換 MMC

図5の各モジュール回路は図2と同様のフルブリッジ変換器である。アームモジュールはA~Fの6つあり各アームのモジュールを制御することにより入出力の電力等回路全体の電力の授受を制御する。図6が本研究で提案した制御ブロック図である。

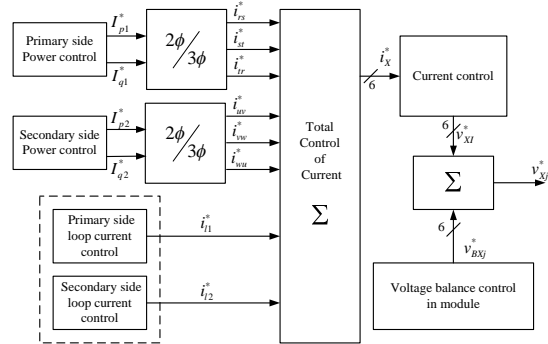


図6 三相-三相交流変換 MMC 制御ブロック図

図6の電力制御(Power control)ブロック図の詳細は図7、循環電流制御(Loop current control)の詳細は図8に示す通りである。図7,8の制御により適正な電力バランスをとるための電流指令値を求め、電流制御により各アームモジュールの電流を制御する。

電流制御のブロック図は図9である。この制御方式は、複数の周波数を含む電流に対しても良い追従性を得るために、現代制御理論の正弦波内部モデル原理に基づいた制御を適用した。

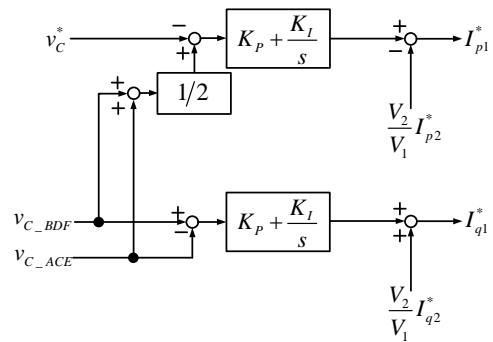


図7 1次側2次側電力制御ブロック図

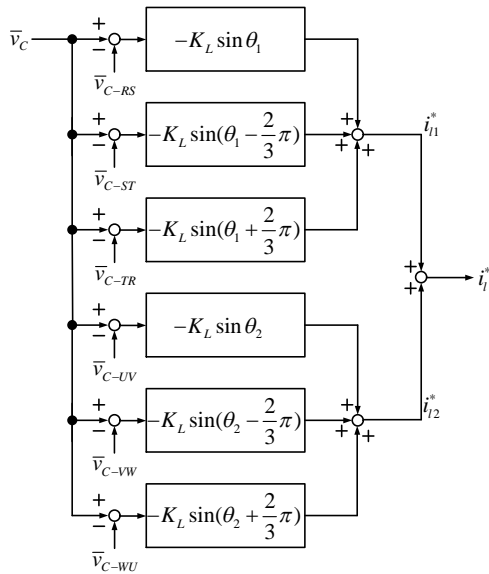


図 8 循環電流制御ブロック図

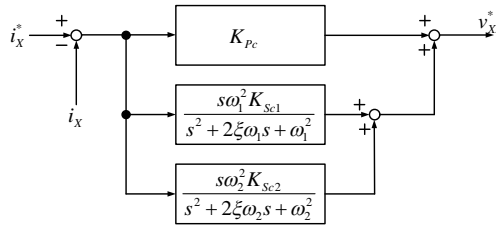


図 9 電流制御ブロック図

図 6 の制御により，モジュールの各コンデンサ電圧を一定に保持しながら，交流系統へ出力する有効電力・無効電力を任意に制御することができる。

本制御方式の動作検証のため行ったシミュレーション結果の一例を図 10 に示す。

図 10-1 より出力がマルチレベル出力で歪みが少ない正弦波となっており，図 10-2~4 の電流も歪みが少なく安定に制御されている。図 10-5 のコンデンサ電圧も一定に制御されており，MMC 回路全体として適正に動作している。また，モジュールの電流制御も正弦波内部モデル原理に基づいた制御により図 10-6 で示すように非常に良く指令値に追従した制御が行われている。これらの結果より，提案した制御方式が正しく動作することが確認された。

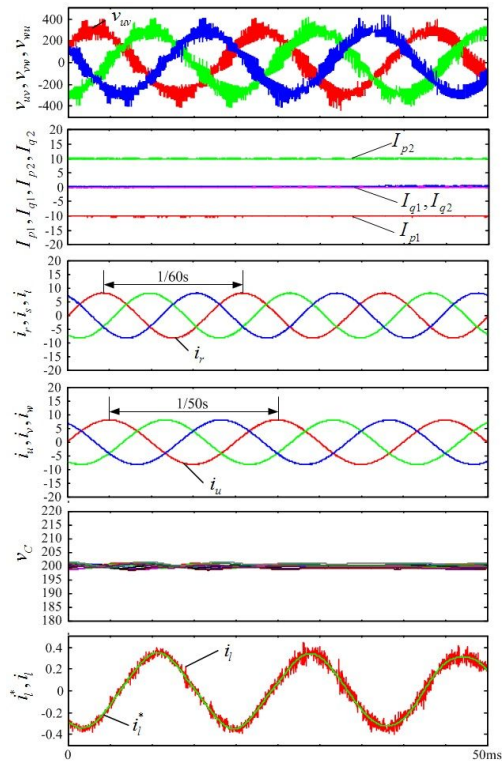


図 10 シミュレーション結果 (三相-三相交流変換 MMC)

### (3) 実機回路作成と実験

本方式の妥当性を実験により検証するために三相-三相変換 MMC 実機回路を試作した。

図 11 は実験システムの全体図，図 12 が実際に作製した実機の外観である。

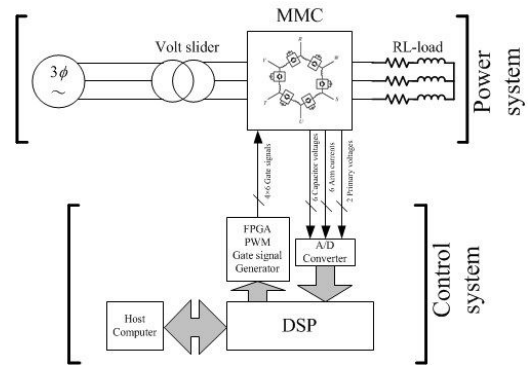


図 11 実験システム全体図

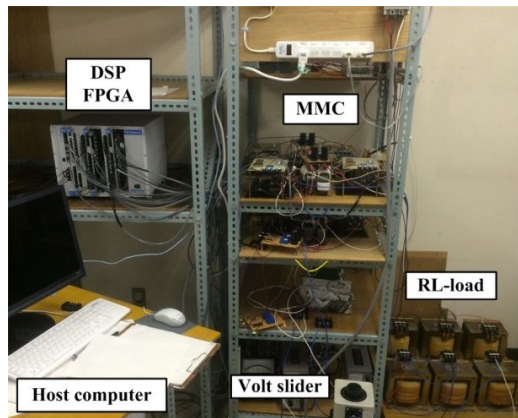


図 12 実験システム外観

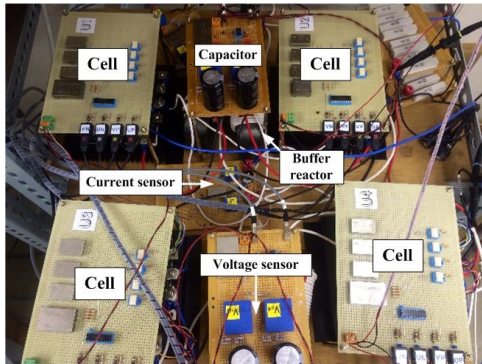


図 13 MMC 主回路 (一部)

MMC のセル部のフルブリッジ変換器は IGBT デバイス(三菱電機: PM50CL1A060)を利用し, そのドライブ回路を作製した。この回路にコンデンサ, リアクトル, センサ等を接続して図 13 のような MMC 主回路を構成した。

制御装置は, DSP(TI: TMS320C6713-225)によるデジタル制御システムを用意し, C 言語による制御プログラムを作成することにより制御を実現した。また IGBT を動作させるための PWM 制御に FPGA(Xilinx: XC3S1500-4FG456C)を利用し, その制御プログラムを作成して実現した。なお, PWM 信号は光ファイバケーブルを介して各 IGBT セルへ送信される。

図 14 に実験結果の一例を示す。

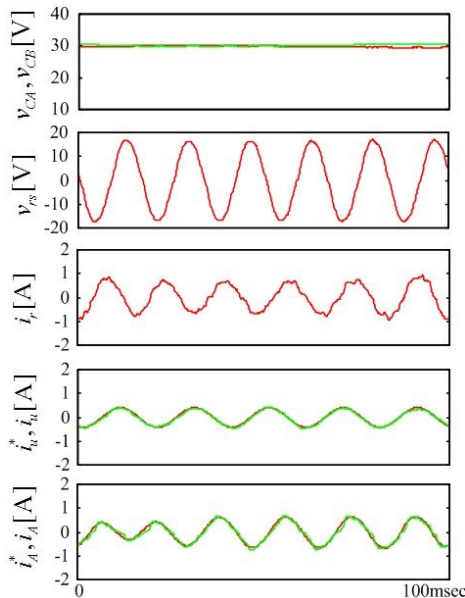


図 14 実験結果 (60Hz 50Hz 変換)

実験により, すべてのモジュールのコンデンサ電圧を一定に保持しながら, 負荷へ一定周波数の一定電力を供給することができ, シミュレーションと同様の動作となることが確認された。この時, 各モジュールの電流も正しく制御されており, 提案した MMC 制御系全体の動作として適正な動作が可能であることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Shin-ichi Hamasaki, Kazuki Okamura, Mineo Tsuji, Control of Modular Multilevel Converter based on Bridge Cells for 3-phase AC/AC Converter, Proc. of The International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 査読有, Paper No.PCI-1671, 2013, 1532-1537  
DOI: 10.1109/ICEMS.2013.6713319

Shin-ichi Hamasaki, Kazuki Okamura, Mineo Tsuji, Power Flow Control of Modular Multilevel Converter based on Double-Star Bridge Cells Applying to Grid Connection, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, Vol.2, No.2, 2013, 248-255

<http://www.jicems.org/LTKPSWeb/pub/pubpf/file.aspx?ppseq=144>

[学会発表](計 3 件)

浜崎 真一, 岡村 一樹, 辻 峰男, “六角形型モジュラーマルチレベル変換器による三相 AC-AC 電力変換制御”, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, No.1-70, 2013 年 8 月 29 日, 山口

椿谷 貴史, 岡村 一樹, 浜崎 真一, 辻 峰男, “内部モデル原理を適用した AC-AC 変換形モジュラーマルチレベル変換器の制御方式”, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, No.Y-40, 2013 年 8 月 28 日, 山口

岡村 一樹, 浜崎 真一, 辻 峰男, “ブリッジセル二重 Y 結線形モジュラーマルチレベル変換器を用いた系統連系電力制御”, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, No.Y-20, 2012 年 8 月 21 日, 千葉

[その他]

ホームページ等

長崎大学 辻・浜崎研究室:

<http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/~asca/index.html>

長崎大学学術研究成果リポジトリ:

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/31556>

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/34236>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shinichi)

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 80363472