

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709016

研究課題名(和文)六角形モジュラーマルチレベルコンバータ構成の新しい三相交流電力変換システムの研究

研究課題名(英文) Research on Novel 3-phase AC/AC Power Conversion System using Hexagonal Modular Multilevel Converter Structure

研究代表者

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shinichi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80363472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力系統接続向けの三相/三相電力変換システムとして、六角形型MMC(H-MMC)による新しい回路構成とその制御方式について提案し、有効性の検証を行った。H-MMC回路と制御方式について理論解析を行い、電力管理とコンデンサ電圧の制御を含めたH-MMC制御手法および蓄電装置を付加したシステムの制御手法を提案した。提案方式について、回路解析ソフト(PSIM)によるシミュレーションによりその有効性を示した。さらに、ミニモデル作製及び制御プログラム開発(DSP,FPGA)を行い実験検証を進めた。実験により提案システムが定常、過渡状態において安定かつ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)：In this research, I investigated a novel circuit and control method of Hexagonal modular multi-level converter (H-MMC) for 3-phase AC/AC converter. I performed theoretical analysis for H-MMC and proposed new control methods with power flow management, capacitor voltage control and energy storage system. I verified effectiveness of the proposed method by simulation(PSIM software). In addition, I developed an experimental system and control programs for H-MMC. I clarified that the proposed H-MMC system is able to operate stably and properly in steady state and transient by the experiment.

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 マルチレベルコンバータ インバータ 系統連系 電力制御

1. 研究開始当初の背景

将来に向けたエネルギー政策により太陽電池・風力発電・燃料電池等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ている。スマートグリッドによる小・中規模のグループ増加を想定した場合、グループ内外の電力授受の影響が顕著になり、逆流問題やそれに伴う電圧降下・上昇、周波数変動等による電力品質低下の恐れが問題視されている。これに対し、三相 AC/AC 電力変換システムがあり、電力送電の中継点やスマートグリッドによりグループ化された送電システム間を接続する変換器として用いることで、電圧・周波数変動等による送電網の不安定性の問題を改善することができる。システムの主な要求として、高電圧に対応できること、入出力の電力を制御できること、電圧歪みが少ないことが挙げられる。一方、モジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)は、汎用の変換器を直列多段接続したモジュール回路構成により、高電圧、かつ、マルチレベル化で歪みが少ない電圧出力が可能な電力変換器として注目されている。また、汎用の変換器で構成されるため安価なデバイスで構成できる点、従来のマルチレベル変換器と比較して各変換器の直流側に必要なトランスが不要であるため小型・軽量化が可能である点も大きな利点である。この MMC 構成を三相 AC/AC 電力変換システムへ応用することは、その要求を満たすと同時に上記のような複数のメリットを共有することになる。

2. 研究の目的

本研究は、現在行っているモジュラーマルチレベルコンバータ (Modular Multilevel Converter : MMC) の研究を応用・拡張した三相 AC/AC 変換のための新しい変換回路構成である六角形 MMC とその制御方式について研究を行い、本方式の動作検証およびその有効性を実験により実証することを目的とする。六角形 MMC をシステムの1次側と2次側の間に接続し、電力の送受電を適切に制御することにより三相 AC/AC 変換器として機能し、送電ラインで問題となる電圧・周波数変動や歪みに対して、上位から下位への相互の影響を与えずに安定した電力の授受を行うことが可能であることを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は六角形モジュラーマルチレベルコンバータ (H-MMC) 構成による新しい三相交流電力変換システムを提案し、そのシステムにおける制御方式の理論解析、シミュレーションによる検証および、実証試験を行う。理論解析では、H-MMC の回路動作と制御理論を数式化、ブロック図化する。制御はコンデンサ電圧制御、有効電力・無効電力制御、循環電力制御、電流制御、バッテリーを用いた電力

平準化制御について理論解析を行う。理論解析はソフトウェアによる回路シミュレーションを行う。さらに、シミュレーションで実験を想定した回路と条件により H-MMC の性能評価を行う。実証試験は、系統連系を模擬した小容量のミニモデル (実験回路) を構築し、提案システムの実験検証を行う。検証では、通常時の運転の検証に加え、系統で変動を与えた場合の実験を行い、提案方式が変動に対しても影響無く適正に動作するシステムであることを示す。

4. 研究成果

図1は本研究で行う六角形 MMC (H-MMC) の回路構成である。単相の電力変換器を多段接続してモジュール化し1つのアームモジュールとし、6つのアームモジュールと短絡防止用のリアクトルで環状に接続する。アームモジュール間の端子 RST を1次側、UVW を2次側として、図2のように三相接続することにより、六角形の MMC 構成となる。主な特徴として、アーム数が6と少ない素子数で済むこと (三相交流変換器アーム数の標準は9)、内部のコンデンサ (またはバッテリー) を介した三相 AC/AC 変換による BTB システムであること、環状であるため H-MMC 内部で電力を循環させることにより、H-MMC 内部のコンデンサ (バッテリー) 間で電力の授受 (電力平準化) が可能であることが挙げられる。

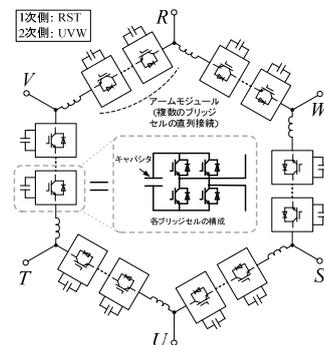


図1 六角形 MMC (H-MMC) 回路構成

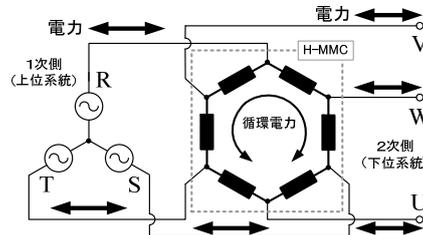
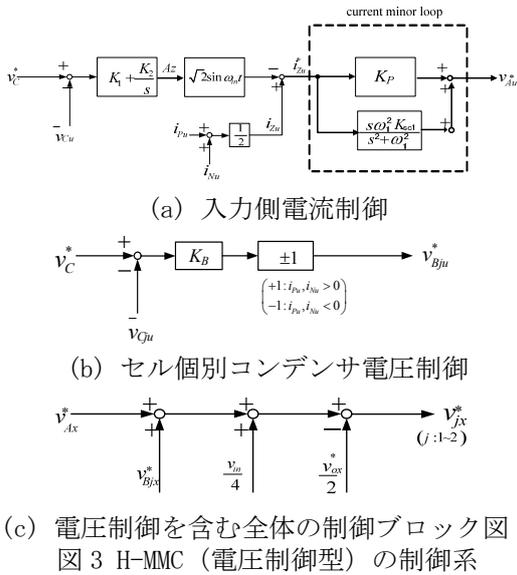


図2 H-MMC の接続方法

制御方式は、単相回路モデルに基づく電圧制御型方式と電力流量制御を考慮した電流制御方式の2つの方式について提案し、特性検証を行った。

(1) 電圧制御型 H-MMC

図3は 本研究で提案した電圧制御型 H-MMC の制御系全体の構成図である。



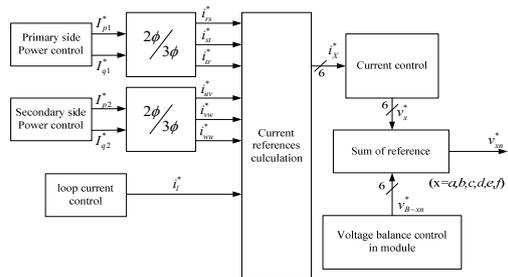
(a)の図が入力側からの電流バランスをとるための制御で、交流波形となるため力率が1となるように制御することができる。電流は内部モデル原理に基づく制御方式を提案し精度の向上を図った。(b)は個別のセル内のコンデンサ電圧を一定に保つために個別に制御するためのものである。(c)は上記2つを含む全体のブロック図で、この中の $v_{ox}^*$ を電圧指令値として与えることにより任意の出力電圧に制御することができる。H-MMCでは三相交流出力とするため、 $u,v,w$ の三相で120度ずつ位相をずらした電圧指令値を与える。

(2) 電流制御型 H-MMC

図4は本研究で提案した電流制御型H-MMCの制御系全体の構成図である。

(a)は全体の構成で、内部は主に(b)~(d)の制御で構成される。(b)は1次側電力制御で力率が1となるように制御することができる。(c)は各相アーム電流指令演算の制御部分で1次側2次側の電力バランスをとりながら、セル内のコンデンサ電圧を一定に保つための制御である。(d)は(c)のアーム電流を精度よく出力するための制御で、内部モデル原理に基づく制御方式を提案した。これに図3(b)と同様の個別コンデンサ電圧制御を加えたものが制御系全体構成となる。

この制御方式により、コンデンサ電圧、1次側電力、2次側電力の相互バランスをとりながらH-MMCを制御することができる。



(a) 制御系全体の構成

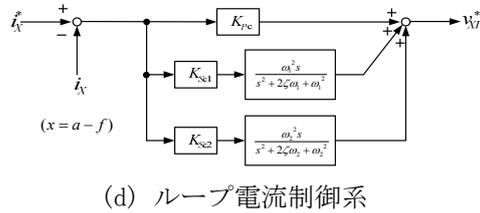
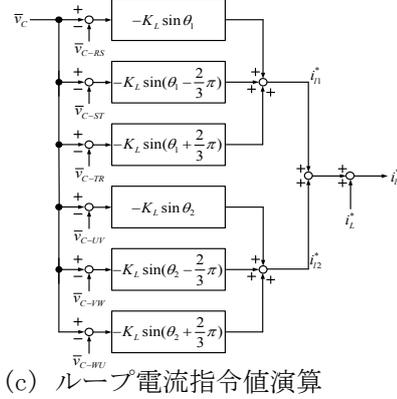
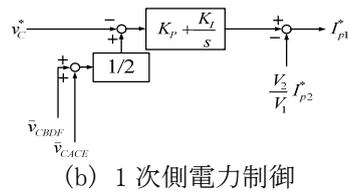


図4 H-MMC (電流制御型) の制御系

(3) 蓄電装置を付加した制御

H-MMCに蓄電機能を付加して電力充放電を適用することを想定した制御方式について検証を行った。

図1内のブリッジセル回路に蓄電機能を付加した回路が図5である。2スイッチを二象限チョップとして蓄電システムを制御する。蓄電装置の制御ブロック図は図6で、消費電力と発電電力からバランスを取るために必要な電力を計算し、それをを用いた各セルからの電流指令値の算出する電力バランス制御とコンデンサ電圧脈動を抑えるための電圧脈動制御の2つを行う。

この制御により、MMC内部で電力蓄電し、電力不足時に必要に応じて電力を供給することが可能となる。なお、本制御方式の一部について特許申請中である。

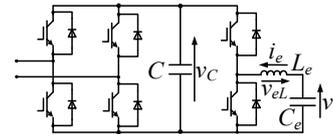


図5 蓄電装置を付加したブリッジセル回路

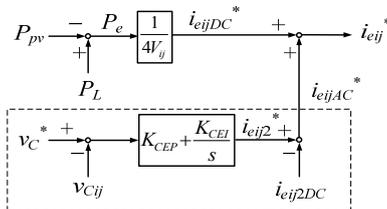


図6 蓄電装置部の制御ブロック図

(4) シミュレーションによる動作検証

本制御方式の動作検証のためにシミュレーションを行った。シミュレーションは回路解析ソフト PSIM(ver. 10.0)を利用した。

結果を図 7, 8 に示す。図 7 は電圧制御型 H-MMC 動作時, 図 8 は電流制御型 H-MMC 動作時で負荷に線形のリアクトル・抵抗負荷を接続して電力供給を行った場合の結果である。

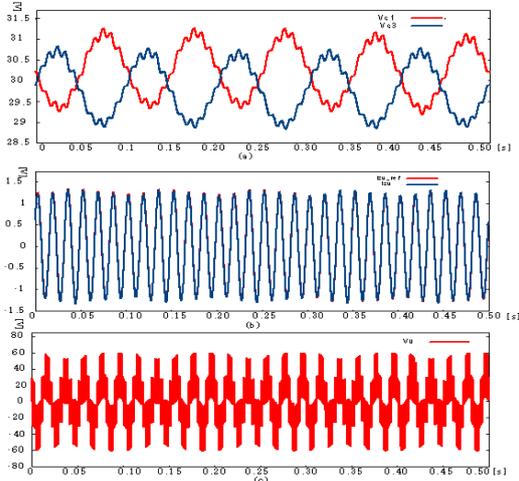


図 7 シミュレーション結果  
(電圧制御型 H-MMC  $f_1: 60\text{Hz}, f_2: 50\text{Hz}$ )

図 7 は上からセルのコンデンサ電圧, 入力側ループ電流, 出力電圧を示しており, 提案する制御によりコンデンサを目標値 30V 付近に保つことができている。入力電流は力率 1 となるように制御しており, 提案する電流制御手法により精度よく制御されている。また, 出力電圧はマルチレベルの階段状波形で目標とする電圧指令通りの電圧を出力できることが確認できた。

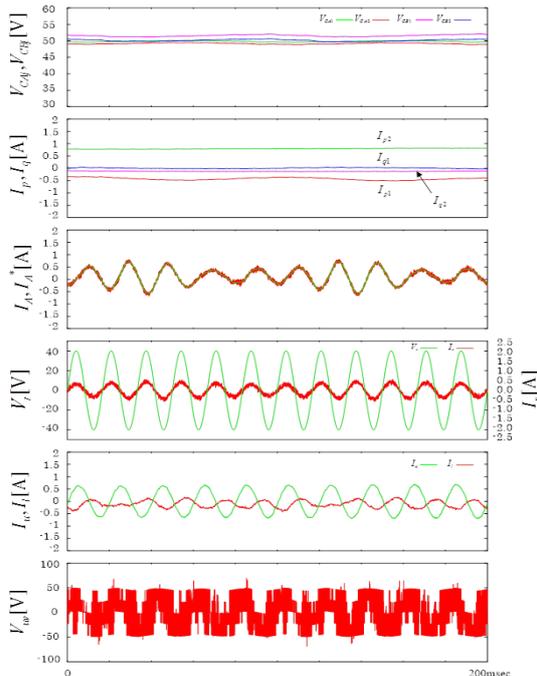


図 8 シミュレーション結果  
(電流制御型 H-MMC  $f_1: 60\text{Hz}, f_2: 50\text{Hz}$ )

図 8 は上から, セルのコンデンサ電圧, 1 次側・2 次側電流の有効・無効成分, モジュールのアーム電流, 1 次側電圧・電流, 2 次側電流とループ電流, 2 次側出力電圧を示している。コンデンサ電圧, 1 次側・2 次側の有効・無効電力を提案する電流制御により適切に制御できており, 有効性を確認できた。

図 10 は蓄電装置部の制御の結果の一例で, 蓄電装置制御の基本特性を確認するためにアーム数を減らした Hブリッジ型回路でパワーコンディショナの利用を想定したモデル(図 9)を用いた。各セルに図 5 のブリッジセル回路を用いて, 提案する制御を適用した。

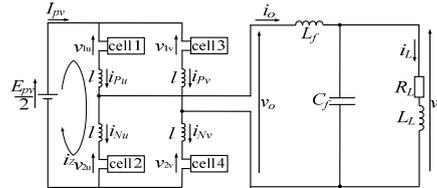


図 9 蓄電装置制御検証用の回路構成 (Hブリッジ回路)

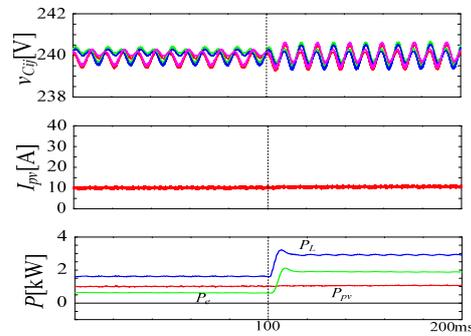


図 10 シミュレーション結果  
(蓄電装置部の制御)

図 10 は上から, セルのコンデンサ電圧, 1 次側電流, 1 次側・2 次側電力および蓄電装置の電力の入出力を示している。入力一定で 2 次側の負荷が増加した場合の結果で, 1 次側の有効電力一定で, 負荷の消費電力が増えた分を蓄電装置から供給するように制御されており, 提案方式により適切に制御できることを確認できた。このシステムを H-MMC の各セルに組み込むことで電力平準化の機能をもたせた高度な電力管理が可能となる。今回はこれを組み込んだ検証には至らなかったが, さらに発展的に検証を進める。

(5) 実験による動作検証

本方式の妥当性を検証するために H-MMC 試験ミニモデルを試作し, 検証試験を行った。

図 11 は実験システムの全体図, 図 12, 13 が作製した実機の外観である。H-MMC 主回路は 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 12 のような H-MMC 主回路(1 相 4 セル×3 相)を構成した。制御装置は, DSP(Myway プラス(株)製 PE-Expert)による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。

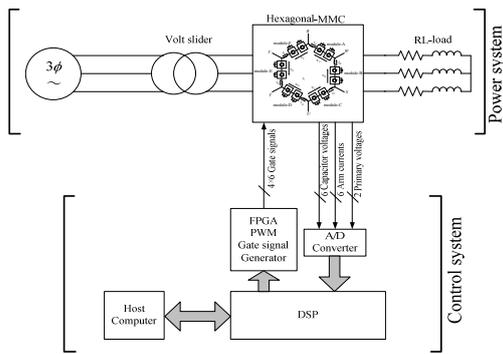


図 11 実験システム構成

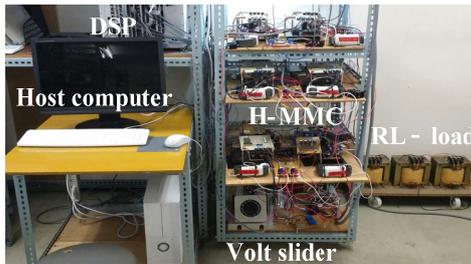


図 12 実験システム外観

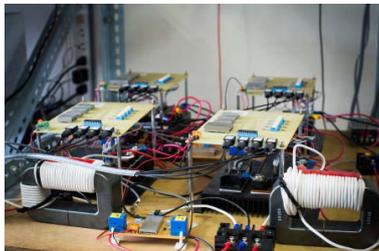


図 13 H-MMC 主回路 (一相 4 セル分)

また IGBT を動作させるための PWM 制御に FPGA 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。今回の実験では、電流制御型 H-MMC の制御について、1 相セル数 2(三相計 6)、4(三相計 12)の 2 通りで行った。図 14~17 に実験結果を示す。

図 14, 15 はいずれも上から、セルのコンデンサ電圧、1 次側電圧・電流、2 次側電流・ループ電流、アーム電流を示しており、提案する制御方式でアーム電流を指令値に適切に精度よく制御することにより、コンデンサ電圧を目標値の 50V 付近に制御し、1 次側を力率 1 の運転を制御しつつ、2 次側へ適切な電力を供給できることを確認した。また、セル数 2, 4 いずれについても同様の動作となることが確認でき、セル数を増加してマルチレベルの階数増加や高電圧化への適用が考えられる。

また、図 16, 17 は系統条件変更時の過渡応答を検証した結果である。図 16 は負荷変動時、図 17 は周波数変動時の結果である。

いずれの場合についても、変動に対して安定に動作しており、特に今回の 2 次側の変動に対して 1 次側に変動の影響がなく、波形も乱れずに滑らかな連続運転で動作できることを確認できた。

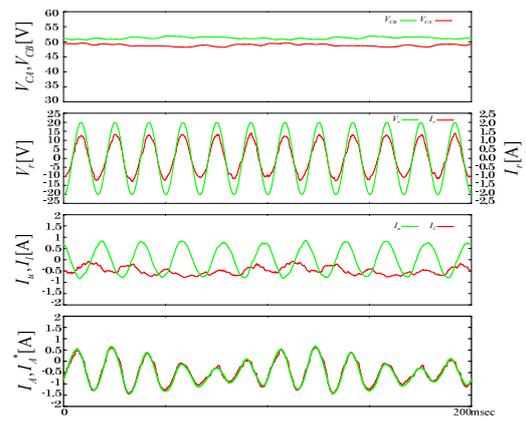


図 14 実験結果(セル数 2,  $f_1: 60\text{Hz}$ ,  $f_2: 50\text{Hz}$ )

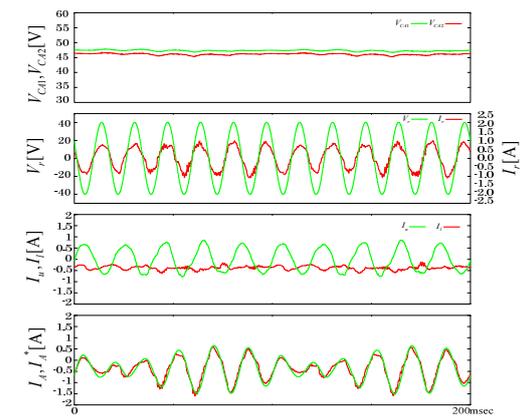


図 15 実験結果 (セル数 4,  $f_1: 60\text{Hz}$ ,  $f_2: 50\text{Hz}$ )

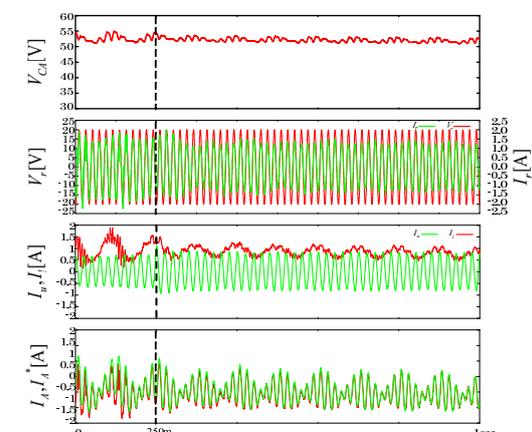


図 16 実験結果 (セル数 2, 負荷変動時)

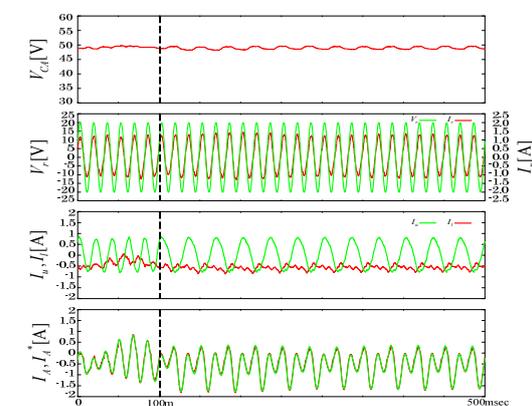


図 17 実験結果

(セル数 2, 2 次側周波数変動時)

## 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6件)

- ① Shin-ichi Hamasaki, Koki Hadano, Mineo Tsuji, Renato Rizzo, Control of Modular Multilevel Converter for AC/AC Conversion, Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Vol.1, 査読有, 2016, 986-991  
DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525970
- ② Shin-ichi Hamasaki, Koki Hadano, Shunsuke Eguchi, Mineo Tsuji, Control of Full Bridge Type Modular Multilevel Converter for Single Phase AC/AC Conversion, Proc. of The International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), No. DS2G-2-1, 査読有, 2016, 2016, 1-6  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7837322/>
- ③ Shin-ichi Hamasaki, Ryohei Nakata, Takahiro Honda, Mineo Tsuji, Control of Power Conditioning System Applying Full Bridge Type Modular Multilevel Converter, Proc. of The International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), No. DS3G-2-5, 査読有, 2016, 1-6  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7837391/>
- ④ Shin-ichi Hamasaki, Takashi Tsubakidani, Syunsuke Eguchi, Mineo Tsuji, Experimental Verification of Hexagonal Modular Multilevel Converter for 3-phase System, Proc. of 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), No. YF009504, Vol.1, 査読有, 2015, 2747-2752  
DOI: 10.1109/IECON.2015.7392517
- ⑤ Shin-ichi Hamasaki, Takahiro Honda, Mineo Tsuji, Novel Circuit of Power Conditioning System with Energy Storage Applying Modular Multilevel Converter Structure, Proc. of 37th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), No. PS08-37, 査読有, 2015, 1064-1069  
DOI: 10.1109/INTLEC.2015.7572314
- ⑥ Shin-ichi Hamasaki, Kazuki Okamura, Takashi Tsubakidani, Mineo Tsuji, Control of Hexagonal Modular Multilevel Converter for 3-Phase BTB System, Proc. of The International Power Electronics Conference (IPEC), 査読有, Vol. 3, 2014, 3674-3679  
DOI: 10.1109/IPEC.2014.6870026

[学会発表] (計6件)

- ① 羽田野 公輝, 江口 俊介, 浜崎 真一, 辻 峰男, “単相 AC-AC 変換用フルブリッジ形 MMC の制御方式の検証”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-3, 2016 年 8 月 30 日, 群馬大学 (群馬県前橋市)
- ② 浜崎 真一, 本多 貴洋, 辻 峰男, “蓄電機能を持つ MMC 形式パワーコンディショナの回路方式と制御”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, No. 1-88, 2016 年 8 月 30 日, 群馬大学 (群馬県前橋市)
- ③ 中田 良平, 本多 貴洋, 浜崎 真一, 辻 峰男, “フルブリッジ形 MMC 方式パワーコンディショナの制御”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-35, 2016 年 8 月 30 日, 群馬大学 (群馬県前橋市)
- ④ 江口 俊介, 浜崎 真一, 辻 峰男, “単相 AC-AC 変換用フルブリッジ形モジュラーマルチレベル変換器の制御方式”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-48, 2015 年 9 月 2 日, 大分大学 (大分県大分市)
- ⑤ 本多 貴洋, 浜崎 真一, 辻 峰男, “蓄電機能を持つ MMC 形式の新しいパワーコンディショナ回路方式”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-36, 2015 年 9 月 2 日, 大分大学 (大分県大分市)
- ⑥ 浜崎 真一, 椿谷 貴史, 辻 峰男, 岡村 一樹, “六角形モジュラーマルチレベル変換器による三相 AC-AC 電力変換制御の基礎実験検証”, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, No. 1-27, 2014 年 8 月 26 日, 東京電機大学 (東京都足立区)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: パワーコンディショナ

発明者: 浜崎 真一

権利者: 国立大学法人 長崎大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-163045

出願年月日: 平成 28 年 8 月 23 日

国内外の別: 国内

[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/10069/34236>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shinichi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 80363472