

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06306

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によるループパワーコントローラの開発

研究課題名(英文) Development of Loop Power Controller using Hexagonal Modular Multilevel Converter

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、三相AC/AC変換の新しい変換器構成である六角形モジュラーマルチレベルコンバータ(H-MMC)を応用し、電力系統安定化のためのループパワーコントローラに適用した新システムの制御についての研究である。これを接続した送電網のモデル化を用いて制御方式を提案し、理論解析および実験検証を行いその有効性を検証した。解析結果より、1次側と2次側フィーダの末端同士の間で相互にやり取りする有効電力、無効電力の流量制御と回路内に付加した蓄電装置の電力授受による電圧バランスをとる制御を提案し適切に動作することを確認した。さらに実験装置と制御プログラムを構築して実験を行い提案制御の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)構成によるループパワーコントローラ(LPC)の回路構成と制御方式を提案し、本方式について動作可能であることを確認した。本システムが系統に適用された場合、MMCの特長からシステム自体の小型・軽量化、出力の低歪み化による高調波低減が期待できる。一方、LPCは特に系統の末端の電圧変動や電力流通の融通化に期待されるシステムであり、LPCにより有効電力や無効電力を制御することができるため分散型電源が多く接続される系統に対しての柔軟な電力系統の運用に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study applies the Hexagonal Modular Multilevel Converter (H-MMC), which is a new converter configuration for three-phase AC/AC conversion, to a Loop Power Controller (LPC) for power system stabilization and proposes its control method. Using the model for the power line with LPC, the control method is proposed and verified by theoretical analysis and experiment. Based on the verification of simulation results, it was confirmed that it works properly about the control of active and reactive power between the feeders of primary side and secondary side and power supply and charge of battery to keep capacitor voltage balance. In addition, the experimental system and program of the control are developed and it is verified that the control of H-MMC is able to work.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：インバータ マルチレベルコンバータ 系統連系

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

現在、エネルギー政策により太陽電池・風力発電等による分散型電源が普及しつつあり、またこれらを1つのグループとして統合的に運用するスマートグリッドの考えも注目されている。このような小・中規模の分散型電源による電力授受の影響が顕著になり、逆潮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。日本国内の電力系統は枝状に分岐した送電網が基本であり、海外で多くみられるメッシュ状の電力系統とは異なり、電力会社による集中型電源による管理型のシステムでは、事故などの非常時における対応や系統フィードの電圧維持調整が容易という利点がある。しかし、系統の下位に分散型電源が接続されるケースでは、発電量が不安定であるほど末端で電圧上昇や急激な電圧低下が起こり規定電圧を維持できない可能性が生じる。特に電力自由化による発電システムの分散化、発送電分離による送電会社の管理でそれが顕著に表れることが危惧される。そこで、注目されるシステムの一つとしてループパワーコントローラ(LPC)が挙げられる。これは、枝状に分岐した系統フィードの末端間に三相/三相の電力変換システムを接続して一部箇所を電力系統ループを構成し、末端間の有効・無効電力の電力流量を制御することにより、系統電圧の適正化・安定化を図ることができるシステムである。この三相/三相の電力変換システムとしては、BTB(Back-to-Back: AC-DC-AC変換)システムがあり、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が大きな利点である。そのため、MMCの回路構成を利用した電力系統用システムは、低歪みで性能がよく、かつ大容量でも小型・軽量化された装置の実現が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、現在研究を行っている三相 AC/AC 変換のための新しい変換回路構成である六角形モジュラーマルチレベルコンバータ(Hexagonal Modular Multilevel Converter: H-MMC)を応用し、電力系統安定化のためのループパワーコントローラ(Loop Power Controller: LPC)に適用した新しいシステムの制御方式について研究を行う。本システムの動作検証およびその有効性について実験により実証することを目的とする。2つの電力系統フィードの末端の間にLPCとしてH-MMCを接続して電力のループを構成し、有効・無効電力の送受電を適切に制御する。また、MMC内部のキャパシタの一部を蓄電装置に置換し、電力の充電・供給を行う電力平準化制御を付加した方式の動作検証を行う。これにより、送電ラインで問題となる電圧変動(低下・上昇)や歪みに対して、適正な電圧を維持し安定した電力系統の運用を行うことが可能であることを理論解析・シミュレーションおよび実験検証により明らかにする。

### 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)によるループパワーコントローラ(LPC)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、提案システムの回路動作と制御理論を数式化、ブロック図化する。最初にH-MMC回路構成を適用したLPCの新しいシステムを構築し、その制御方式を提案する。提案する制御は、H-MMCの基本的な制御として、キャパシタ電圧の均一化制御、アームモジュール電流制御、循環電力制御があり、これにLPCとしての制御である有効電力・無効電力制御、蓄電装置の制御を付加して提案するシステムの制御を行う。これらの制御について理論解析・シミュレーションを行う。理論解析はパワーエレクトロニクス専用のソフトウェアによる回路シミュレーションを行う。

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、H-MMCによるLPCの性能評価を行う。H-MMC主回路には半導体デバイスとしてIGBTによる電力変換器を作成し利用する。制御装置にはデジタル制御装置(DSP)およびFPGAを用いる。DSPおよびFPGAは制御プログラムを作成して動作させる。実験では、通常時の運転の検証に加え、電圧変動を与えた場合の実験、電力平準化実験を行い、提案方式が変動に対しても適正に動作するシステムであることを示す。

### 4. 研究成果

#### (1) H-MMCの基本構成

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て1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、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)、内部コンデンサ(またはバッテリー)を介した三相AC/AC変換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。

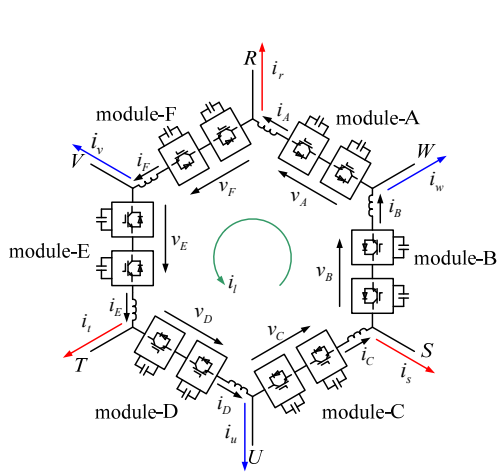


図1 六角形 MMC (H-MMC) の回路構成

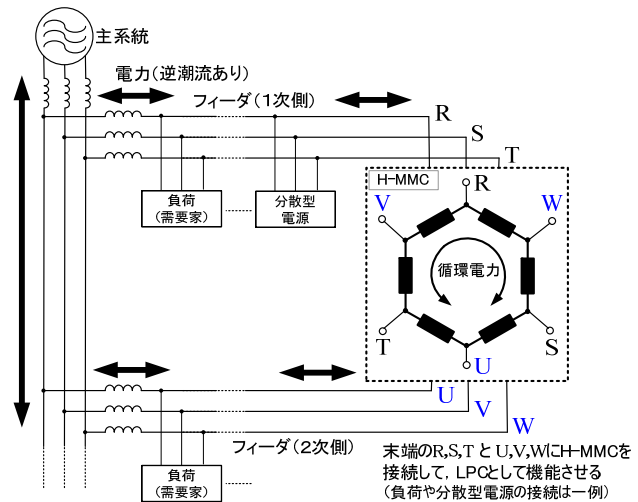


図2 LPC の系統接続図

H-MMC をループパワーコントローラ (LPC) として接続した系統連系システムが図2である。LPC は枝状に分岐した系統フィーダの末端間に三相/三相の電力変換システムを接続して一部箇所 に電力系統ループを構成し、末端間の有効・無効電力の電力流量を制御することにより、系統電圧の適正化・安定化を図ることができるシステムである。この三相/三相の電力変換システムとしては、BTB (Back-to-Back : AC-DC-AC 変換) システムがあり、主要要求として、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。

本研究では LPC 接続を想定したモデルとして、1次側の負荷を省略した図3のモデルを用いて検証を進めた。モジュール内のセルは、図4に示すような半導体素子の IGBT によるフルブリッジ形の回路で、通常は左図のキャパシタのみの回路であるが、本研究では右図の蓄電装置 (バッテリー) を組み込んだ回路についても研究を行った。

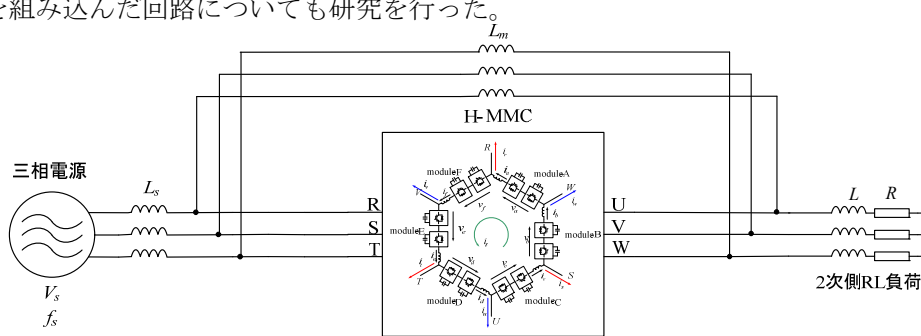


図3 H-MMC による LPC の系統接続解析モデル

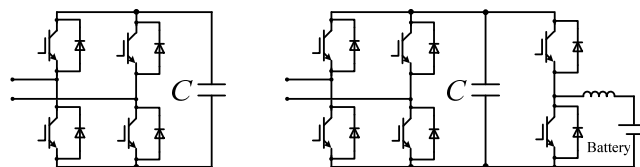


図4 モジュール内のセルの構成 (左: キャパシタのみ, 右: 蓄電装置あり)

## (2) 制御方式

提案する制御は、H-MMC の制御部にモジュール内部のキャパシタ電圧の均一化制御、アームモジュール電流制御、循環電力制御があり、LPC の制御として有効電力・無効電力の流量制御および蓄電装置の入出力制御があり、これらを連携して制御する方式により提案するシステムの制御を行う。

図5はH-MMCによるLPCの制御ブロック全体図を示している。1次側 (Primary) の電力制御にはキャパシタ電圧の平均値を一定に保つ制御も含まれており、これに2次側 (Secondary) の電力制御も組み合わせて全体の電力バランス授受を行う。また、図には蓄電装置の入出力制御は記載されていないが、蓄電装置の電力授受も含めた電力バランスはこの1次側、2次側の電力制御部に含まれる。さらに循環電力制御を付加することにより、H-MMC 全体の電力授受および循環を安定化することができる。これらの制御で得られた指令値に対して、電流制御を行って H-MMC から電流を適切に出力し、さらに、キャパシタの個別電圧制御や電流フィードフォワード制御を追加することで、制御性能の向上を図っている。また、最終的に得られる電圧指令値について各モジュールで PWM 制御を行うことで目的の動作が実現できる。

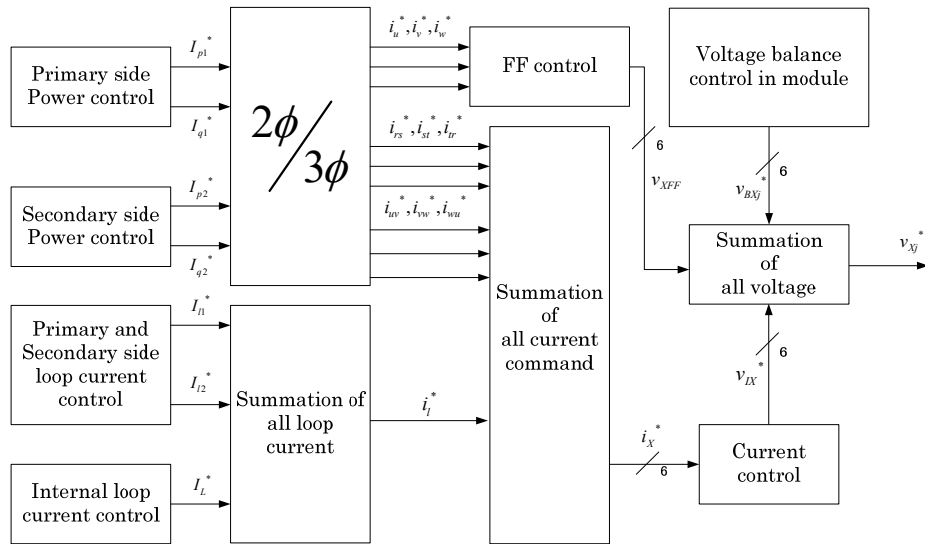


図5 H-MMCの制御ブロック全体図

### (3) シミュレーションおよび実験結果

上記の制御によるLPCの動作をシミュレーション，および実験により検証を行った。図3の回路により行ったシミュレーション結果の一例を図6に示す。

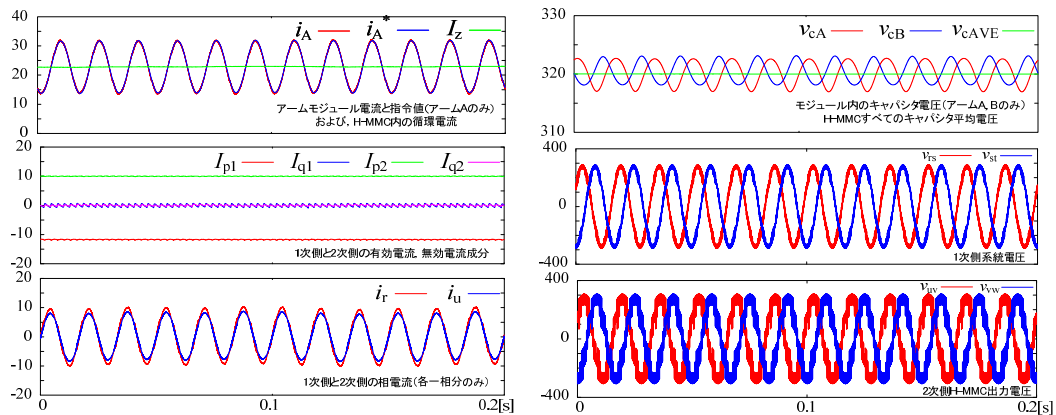


図6 H-MMCによるLPCのシミュレーション結果

図6より，アームモジュールの電流( $i_A$ )が指令値( $i_A^*$ )に精度よく追従しており循環電流( $i_z$ )も一定となっている。これにより，キャパシタ電圧の平均値( $v_{cAVE}$ )および各セルのキャパシタ電圧も( $v_{cA}$ ,  $v_{cB}$ )も適切に一定制御されている。なお，わずかな脈動は電力の流出入に伴うもので必ず生じるものである。さらに，1次側と2次側の有効電流，無効電流も一定に制御されており，系統電圧は実効値が一定であるので各電力が一定に制御されていることを意味する。このケースでは有効電力を1次側から2次側へ送電した場合で，無効電力は0となるように制御している。このときの相電流，系統電圧も一定に安定に動作している。また，H-MMCの出力電圧(2次側)はマルチレベルの階段状の波形になっており，歪みの少ないマルチレベル出力を得られることが確認された。

実験では系統連系を模擬した小容量のミニモデルを作製し検証を行った。図7が実験システムの全体構成図，図8が作製した回路のモジュール部の写真である。LPCを模擬したH-MMC主回路はIGBTによる変換器(モジュール)で構成し，それに抵抗，リアクトル，キャパシタを接続して作製した。制御はDSPとFPGAのプログラムに分かれており，DSP(TMS320C6713-225-TI)でセンサからAD変換された電圧・電流信号を読み取り，それを用いて制御演算を行う。提案する制御のほぼ全てをこのDSPで処理する。DSPのプログラムはC言語で作成した。さらに，DSPで得られた電圧指令に従って電圧を出力するPWM制御部分はFPGA(XC3S1500-4FG456C-Xilinx)で処理させ，DSPと連携させることにより目的とする動作全体の処理を実現できる。FPGAはハードウェア記述言語であるVHDLで作成した。

また，有効電力や無効電力などの制御指令や制御ゲインの調整などはDSPと通信を行うパソコン(Windows)から操作を行うことができ，これにより任意の条件設定や調整が可能である。なお，今回の実験では動作の基礎確認のためアームモジュールは各1セルで行った。

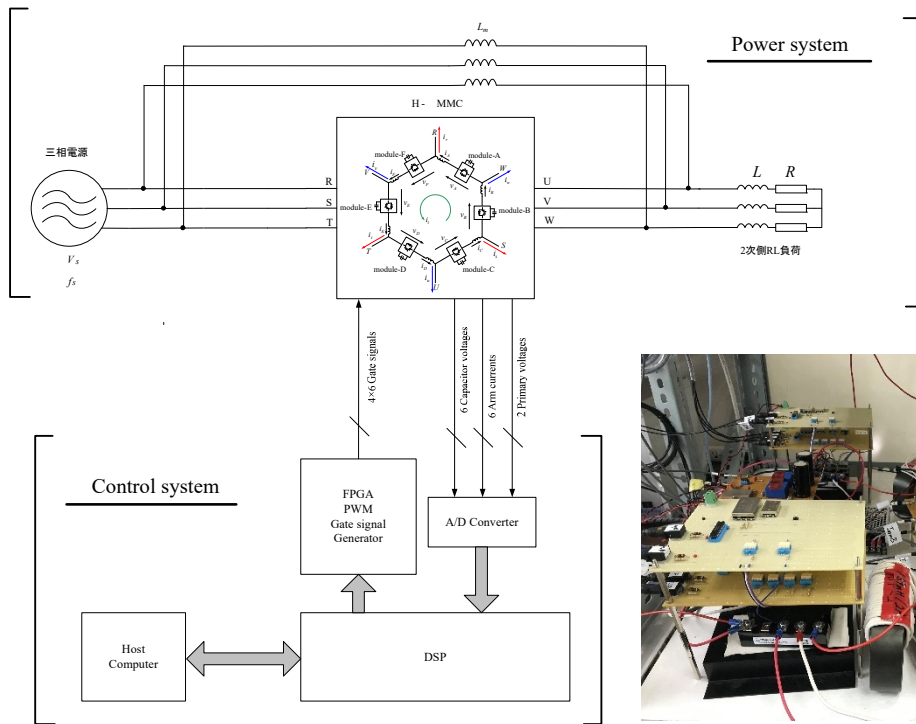


図7 実験システム構成図

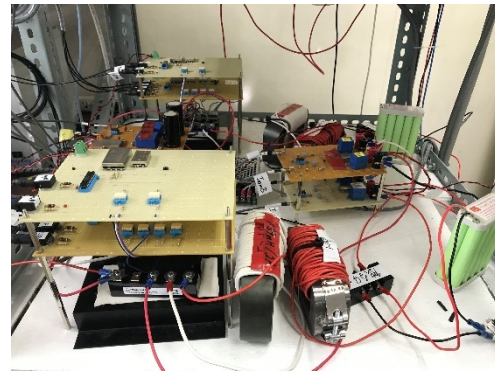


図8 作製したセルモジュールの一部

図9に実験結果の一例を示す。実験はシミュレーションと同様に1次側から2次側への電力送電を行った場合の結果である。図9左のように安定動作時は電流制御が正しく行われ、キャパシタ電圧も一定に制御できており、一定電力を送電する動作が確認された。しかし、動作中不定期に図9中央のような擾乱が見られることがあった。これにより一時的に各部の電圧・電流が乱れている。これはシミュレーションでは見られなかった現象で、電圧歪みや1次側と2次側との位相の不整合による理由が考えられるが、明確な理由は判明しておらず今後の課題としたい。

最後にH-MMC内部に蓄電装置(ニッケル水素バッテリー)を付加した場合の電力供給および充電実験を行った。結果の一例を図9右に示す。前述のLPC動作時の擾乱の問題があったため、本実験ではループ接続とせず交流の主電源と負荷のみを接続した回路で行った。このケースでは、モジュール内のすべてのバッテリーから均等な電力を分担してシステムへ出力した場合で、バッテリーの出力が均等に制御されて出力しキャパシタ電圧も一定に保ちながらH-MMCで電力授受を行えることが確認された。バッテリーへの均等な充電についても同様に制御可能であることを確認した。

以上のことから、H-MMCによるLPCの回路構成と制御方式を提案し、本方式について動作可能であることを確認した。本システムがシステムに適用された場合、MMCの特長からシステム自体の小型・軽量化、出力の低歪み化による高調波低減が期待できる。一方、LPCは特にシステムの末端の電圧変動や電力流通の融通化に期待されるシステムであり、LPCにより有効電力や無効電力を制御することができるため分散型電源が多く接続されるシステムに対しての柔軟な電力システムの運用に貢献できると考えられる。

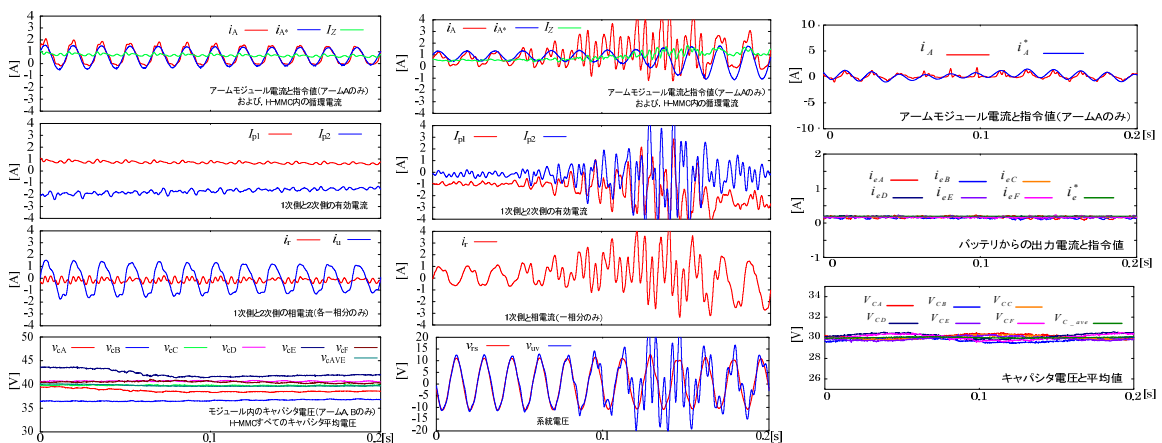


図9 LPC 実験結果

(左：安定動作時，中央：擾乱発生時，右：蓄電装置による電力供給時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shin-ichi Hamasaki, Md Roknuzzaman, Naoki Mansai, Naoto Seto, Mineo Tsuji	4. 巻 1
2. 論文標題 Control of Hexagonal Modular Multilevel Converter with Energy Storage for 3-phase AC/AC System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion	6. 最初と最後の頁 456-461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SPEEDAM.2018.8445418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Md Roknuzzaman, Shin-ichi Hamasaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Control of Full Bridge type Modular Multilevel Converter for AC/AC Conversion with Grid Connection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of 2018 International Conference on Smart Grid	6. 最初と最後の頁 64-69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ISGWCP.2018.8634554	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Md Roknuzzamani, Naoto Seto, Naoki Mansai, Tomoya Yamaji, Shin-ichi Hamasaki
2. 発表標題 Control Method of Modular Multilevel Converter for 3 phase AC/AC Conversion
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸 直人, 萬歳 直紀, 浜崎 真一, 大道 哲二
2. 発表標題 循環電流制御を用いた六角形MMCによるループパワーコントローラ
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山持 知也, 萬歳 直紀, 瀬戸 直人, 浜崎 真一, 大道 哲二
2. 発表標題 三相AC-AC変換用モジュラーマルチレベルコンバータの出力電圧制御
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 悠貴, 浜崎 真一, 大道 哲二
2. 発表標題 デジタル制御ループパワーコントローラの動作特性検証
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Md Roknuzzaman, Shin-ichi Hamasaki
2. 発表標題 Control of Full Bridge type Modular Multilevel Converter for AC/AC Conversion with Grid Connection
3. 学会等名 7th IEEE International Conference on Smart Grid (iCSG) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬戸 直人, 萬歳 直紀, 浜崎 真一, 辻 峰男
2. 発表標題 六角形MMCによる三相AC-ACパワーフロー制御
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 萬歳 直紀, 瀬戸 直人, 浜崎 真一, 辻 峰男
2. 発表標題 蓄電機能を持つ六角形MMCの三相AC-AC電力平準化制御
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Md Roknuzzamani, Shin-ichi Hamasaki, Mineo Tsuj
2. 発表標題 Control of Full Bridge type Modular Multilevel Converter for AC/AC Conversion with Grid Connection
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin-ichi Hamasaki, Md Roknuzzaman, Naoki Mansai, Naoto Seto, Mineo Tsuji
2. 発表標題 Control of Hexagonal Modular Multilevel Converter with Energy Storage for 3-phase AC/AC System
3. 学会等名 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin-ichi Hamasaki, Md Roknuzzaman, Naoki Mansai, Naoto Seto, Mineo Tsuji
2. 発表標題 Control of Hexagonal Modular Multilevel Converter with Energy Storage for 3-phase AC/AC System
3. 学会等名 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 岩本 勇志, 中田 良平, 浜崎 真一, 辻 峰男
2. 発表標題 蓄電機能を持つモジュラーマルチレベルコンバータによるVWF制御
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中田 良平, 浜崎 真一, 辻 峰男, 本多 貴洋
2. 発表標題 蓄電機能とコンデンサ電圧脈動補償を持つMMC形式パワーコンディショナの制御
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩本 勇志, 中田 良平, 浜崎 真一, 辻 峰男
2. 発表標題 回生に対応したモジュラーマルチレベルコンバータによるVWF制御
3. 学会等名 第70回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----