

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560332

研究課題名(和文) モジュラーマトリックスコンバータを用いた低周波送電用周波数変換器に関する研究

研究課題名(英文) Study on frequency converter for low frequency transmission using modular matrix converter

研究代表者

三浦 友史 (MIURA, Yushi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90354646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：スイッチング素子4個とキャパシタ1個によって構成されるHブリッジセルを、9本のアームにおいてそれぞれ複数直列接続することによって、大容量・高電圧化が容易な交流/交流直接変換器であるモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータに対し、電圧空間ベクトル変調を用いた電力制御法とHブリッジセル間のキャパシタ電圧平衡制御法を提案し、シミュレーションと2kVAの装置を使った実験によって商用周波数から低周波数まで幅広い領域で安定に運転できることを示した。これらの結果より、洋上風力発電などに適用が検討されている低周波送電システムにモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータが適用可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Modular multilevel matrix converter (MMxC) for low frequency transmission that is applicable to off-shore wind farms is investigated. Its converter arm is composed of series-connected H bridge cells, and each H bridge cell consists of 4 switching devices and a capacitor. Thus the MMxC is able to output multilevel waveforms and therefore suitable for high power and high voltage applications. In this research, for the MMxC, power flow control and capacitor voltage balancing control among H bridge cells using voltage space vector modulation are proposed. A broad frequency range of the proposed controls from a low frequency to a commercial frequency are verified through numerical simulations and experiments using a 2-kVA MMxC.

研究分野：パワーエレクトロニクス、電力系統、核融合装置、超伝導コイルなどに適用される大型電源

キーワード：モジュラーマトリックスコンバータ 低周波送電 電圧空間ベクトル変調 キャパシタ電圧平衡制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 低周波送電

長距離送電や異系統連系に適用される直流送電に代わり、保護に有利で電蝕の影響も少ない低周波送電の適用が検討されている。洋上風力発電に適用する場合には、ケーブルの充電電流を低減し低損失化が期待できるだけでなく、ギヤレスの誘導機を発電機に使用することも可能で、安価でメンテナンスが容易なシステムを構築できる可能性がある。また、超伝導ケーブルを用いた配電システムに適用すれば、保護の他に交流損失の低減なども期待できる。しかし、低周波送電のためには、商用周波数から低周波に変換する大容量でかつ高電圧に適用可能な交流/交流電力変換器が必要であった。

(2) モジュラーマトリックスコンバータ

直列接続されたチョップパや単相フルブリッジをモジュールとして電力変換器のアームを構成しマルチレベル化することで、大容量・高電圧・低ひずみ化が容易となるモジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)が精力的に研究されている。MMCを交流/交流変換器に適用するためには、直流リンクを介して2つのMMCをBack-to-Back式に接続する必要がある。この場合、アームの数は $6 \times 2 = 12$ 本となる。一方、直流リンクを設けず、従来のマトリックスコンバータの9本のアームをモジュール化することによって交流/交流直接変換を実現するモジュラーマトリックスコンバータ(MMxC)についても、MMCに比べ数は少ないが研究成果が報告されている。その多くはアーム間に循環電流を流すことによってセルのキャパシタ電圧平衡制御を行う手法を採用しているが、この手法には低周波に変換する場合や入出力の周波数が一致する場合において制御が困難になるという問題があった。

2. 研究の目的

交流/交流直接変換を実現するMMxCに対して、循環電流を制御する手法ではなく電圧空間ベクトル変調を採用し、低周波から商用周波数まで幅広い運転を可能とする制御手法を提案および実証することによって、MMxCの低周波送電への適用可能性を検討する。また、従来報告されていた電圧空間ベクトル変調を用いた方法では、セルを多数直列接続しマルチレベル化した場合の対応が不明であったが、本研究ではセル数の増加にも対応した制御手法を検討し、大容量・高電圧化への課題を解決することを目的とする。

3. 研究の方法

セルを多段化するモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータについては、周波数変換運転の回路シミュレーションを行い、その制御手法の妥当性と運転性能の評価を行う。また、5レベルのMMxC試験装置を製

作し、DSPおよびFPGAを用いた制御系を構築する。そして、MMxCによって、回生可能な可変電圧可変周波数電源と商用系統を接続し、商用周波数60Hzに対して低周波から60Hzの周波数変換運転を行い、有効電力・無効電力制御を実証する。これらシミュレーション結果と試験結果より、MMxCの低周波送電への適用の可能性を評価する。

4. 研究成果

(1) 電圧空間ベクトル変調を用いた制御

MMxCに対し、セルの多段化に対応した電圧空間ベクトル変調を用いた電力潮流制御とキャパシタ電圧平衡制御の手法を提案した。本手法によれば、MMxCのアーム間に循環電流を継続的に流す必要がないため、各アームに必要とされるリアクトルを省略でき、リアクトルによる損失を低減できる可能性がある。また、循環電流を用いた制御に比べ、出力周波数が極低周波であっても、あるいは入力周波数と同一であっても、特別な制御を用いずに安定に運転できるという特長を持つため、提案手法は、可変速モータドライブや風力発電のような幅広い周波数範囲に対応した周波数変換器に適しているといえる。

以下、図1に示すようなシステム1と2を接続するMMxCの構成を例に説明する。

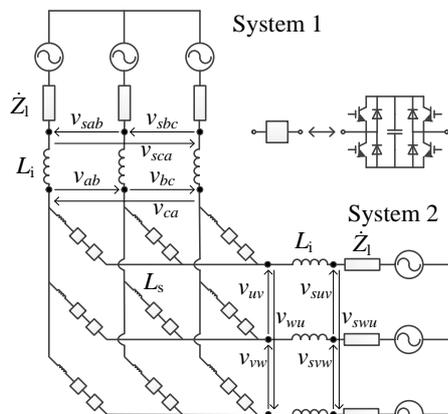


図1 5レベルモジュラーマトリックスコンバータ

有効電力・無効電力制御

有効電力・無効電力制御については、比例積分制御器を用いて両システムの線間電圧指令値を得て、これをMMxCが出力することによって行う。図2は図1の5レベルMMxCが出力可能な線間電圧の空間ベクトルと指令値ベクトル V_{ref} を $\alpha\beta$ 座標系において示したものである。 V_{ref} は V_{ref} が含まれる三角形を構成する3つの電圧ベクトル(V_k, V_l, V_m)とデューティ比(d_k, d_l, d_m)によって次式の通り表される。

$$V_{ref} = d_k V_k + d_l V_l + d_m V_m \quad (1)$$

V_{ref} をシステム1と2についてそれぞれ求めることによって(V_{k1}, V_{l1}, V_{m1})と(V_{k2}, V_{l2}, V_{m2})を得ることができる。そして、サンプリング時間

T_s において図3に示すタイミングチャートに従って電圧ベクトルを順次出力することによって指令値電圧を実現できることになる。また、電圧ベクトルとデューティ比は直交座標変換を用いることによって容易に算出できる手法を提案し、計算量の低減を図っている。

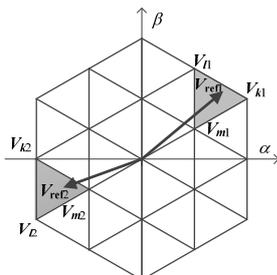


図2 電圧空間ベクトル

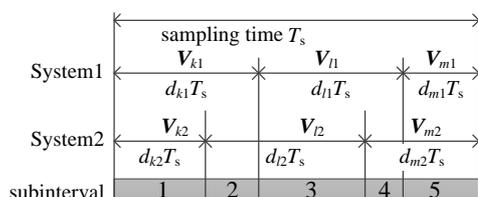


図3 タイミングチャート

キャパシタ電圧平衡制御

キャパシタ電圧平衡制御は、3つの制御から構成される。第一はすべてのセルのキャパシタ電圧の平均値を指令値に追従させる制御である。これはの有効電力制御において実行される。

第二の制御はアーム間の電圧平衡をとるものである。一つのアームに接続されたすべてのセルのキャパシタ電圧の総和をアーム電圧と定義し、このアーム電圧をアーム間で平衡させることを目的とする。図3に示す各サブインターバルにおいて、MMxCにはシステム1と2のそれぞれに3個の線間電圧指令値が与えられる。このとき、これら計6個の指令値を実現するためには、9本のアームのうち5本に電流を流し（接続アーム）、他の4本は開放する必要がある。また、これら接続するアームと開放するアームは1サンプリング時間の間、変えないものとする。この接続するアーム5本の選び方は、セルの段数に関わらず8通りあることがわかっている。この8通りすべてに対し、1サンプリング時間後のアーム電圧の、平均値との誤差を予測して計算し、誤差が最も小さくなるアームの組み合わせを選択するものとした。この手法によってアーム電圧の平衡が実現できる。

第三は、同一アームに接続されたセルの間でキャパシタ電圧の平衡を実現する制御である。これは、多段に接続されたセルのうち、どのセルに電圧を出力させるかを選択することによって実現される。アーム電流がセルのキャパシタを充電する方向に流れている場合には、キャパシタ電圧が低い方のセルから優先的に電圧を出力させ、一方、逆方向の

場合には、キャパシタ電圧が高い方のセルから優先的に電圧を出力させる。この結果、アーム内のセルのキャパシタ電圧は平衡されることになる。

この手法により、マルチレベル化したMMxCにおいても電圧空間ベクトル変調法の適用が可能となり、幅広い周波数領域において安定な運転が実現されることになった。

(2) シミュレーションおよび実験結果

図1に示す構成で、表1に示す諸元をもつMMxCを製作した。ただし、実験時は、System1は電力回生が可能な可変周波数電源、System2は商用系統を用いている。制御系はDSPおよびFPGAを用いて構成し、各セルのスイッチング素子の駆動回路までは光ファイバーによって信号を送っている。Hブリッジセルには4つのスイッチング素子（IGBT）があるため、1セルあたり4つの信号が必要となるが、各駆動回路に論理回路を設け4つのスイッチング素子の状態を8種類に制限することにより1セルあたりの光ファイバーの本数を4本から3本に低減する工夫をしている。本回路構成について数値シミュレーションおよび実験を行い、提案する手法の妥当性について検討した。

表1 回路諸元

モジュラマトリックスコンバータ	
レベル数	5
定格容量	2 kVA
制御周波数	2 kHz
キャパシタ電圧	180 V
キャパシタンス	470 μ F
横流インダクタ	30 μ H
System 1 (可変電圧可変周波数電源)	
線間電圧	200 V
周波数	10, 20, 50, 60 Hz
連系インダクタ	10 mH (0.15 pu@50 Hz)
System 2 (商用系統)	
線間電圧	200 V
周波数	60 Hz
連系インダクタ	8 mH (0.15 pu@60 Hz)
指令値	
有効電力	2 kW (System1 \rightarrow 2)
無効電力	0 kvar (System1, 2)

異周波数変換運転

大容量の異周波数系統の連系を想定して、50Hz/60Hzの周波数変換のシミュレーションおよび実験を行った。図4に結果を示す。アーム電圧もキャパシタ電圧も平衡し、安定に運転できている。総合ひずみ率は5レベルの波形のため5~8%程度であるが、これはセルの直列接続数を増やすことによって改善できると期待できる。またシミュレーションと同様の運転が実現できており、提案する制御法の妥当性が示された。

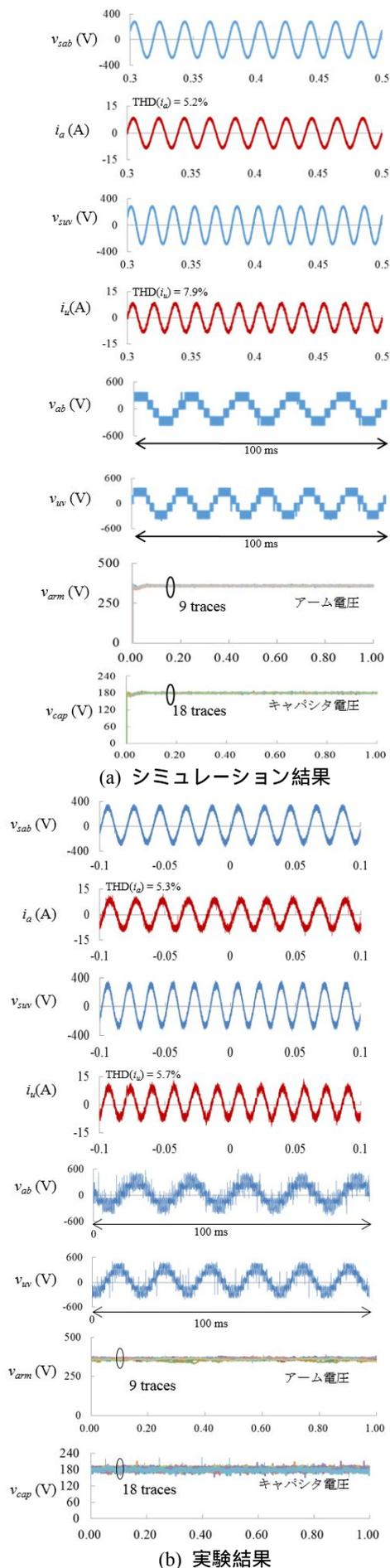


図4 50Hz/60Hz 周波数変換

入出力周波数が一致する場合の運転
 配電系統の電流潮流制御器（ループコントローラ）としての MMxC の適用を想定して 60Hz/60Hz の周波数変換運転の実験を行った。図5に結果を示す。循環電流を制御する手法においては、入出力周波数が一致する場合には、キャパシタ電圧の振動が発散し、特別な手法を用いなければ運転を継続することが難しい。一方、本提案手法を用いれば、異周波数変換と同じ制御で安定して運転できることを示すことができた。

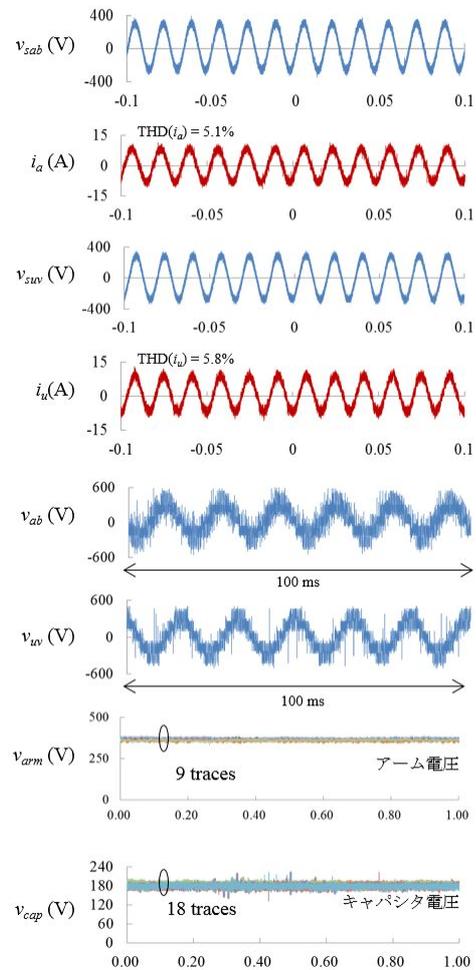


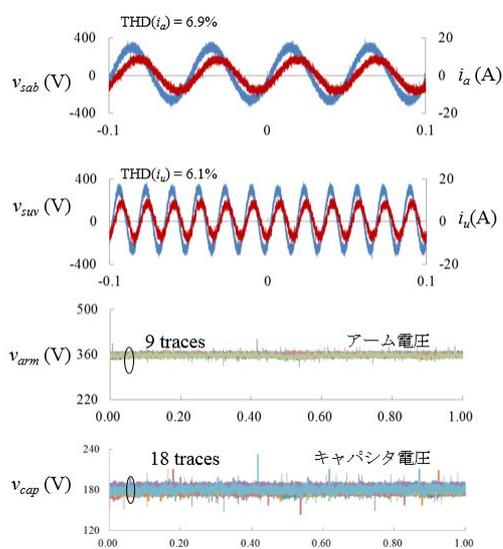
図5 60Hz/60Hz 周波数変換実験結果

低周波数変換運転

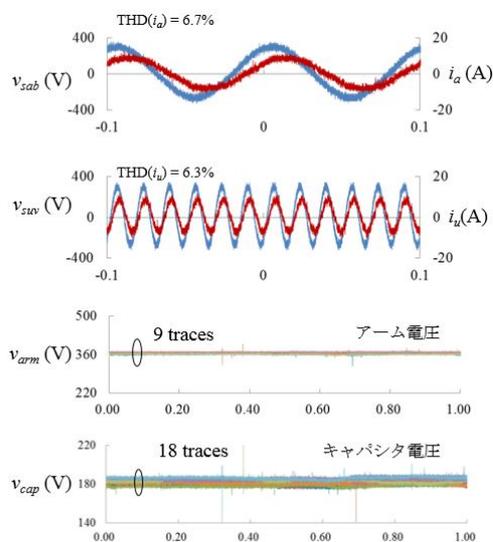
低周波送電への MMxC の適用を想定した 20Hz/60Hz, 10Hz/60Hz の周波数変換の実験の結果を図6に示す。出力周波数が入力周波数の1/3となる20Hzの場合においても、さらに低周波となる10Hzの場合においても、問題なく運転を継続できることを示すことができた。

以上、 v_{sab} , i_a , v_{zuv} , i_u の結果より、電圧空間ベクトル変調を採用した本提案手法を用いれば、MMxC のマルチレベル化にも対応でき、かつその出力周波数を、低周波から入力周波数と同一の値まで幅広く変化させ、安定に運転できることを示すことができた。したがって、低周波送電、あるいはモータドライブヤ

風力発電等の大容量降圧・可変速用途へのMMxCの適用可能性を示せたといえる。



(a) 20 Hz/60 Hz 周波数変換



(b) 10 Hz/60 Hz 周波数変換

図6 低周波変換実験結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

Y. Miura, K. Inubushi, M. Ito and T. Ise, "Multilevel modular matrix converter for high voltage applications: Control, design and experimental characteristics," in *Conf. Rec. of annual conference of the IEEE industrial electronics society, IECON 2014*, pp. 4690-4696.

Y. Miura, T. Mizutani, M. Ito and T. Ise, "Modular multilevel matrix converter for low frequency AC transmission," in *Conf. Rec. of IEEE-PEDS 2013*, pp. 1079-1084.

Y. Miura, T. Mizutani, M. Ito, and T. Ise, "A novel space vector control with capacitor voltage balancing for a multilevel modular

matrix converter", in *Conf. Rec. of IEEE energy conversion congress & exposition, ECCE Asia downunder 2013*, pp. 442-448.

吉田知明, 藤川拓也, 犬伏恵滋, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの階層化された制御系の検討, *パワーエレクトロニクス学会誌*, 査読無, Vol.40, 2015, p.226

吉田知明, 藤川拓也, 犬伏恵滋, 三浦友史, 伊瀬敏史, 階層化された制御系をもつモジュラーマトリックスコンバータの非同期・遅延動作の影響評価, 平成27年電気学会全国大会論文集, 査読無, 第4分冊, 2015, p.187

犬伏恵滋, 吉田知明, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, キャパシタ電圧の平衡化を行うマルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧制御方式, *電気学会半導体電力変換モータドライブ合同研究会資料*, 査読無, SPC-15-036, MD-15-036, 2015

犬伏恵滋, 吉田知明, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, 5レベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制-実験による特性検証-, 平成26年電気関係学会関西連合大会講演論文集, 査読無, 2014, P-17

吉田知明, 犬伏恵滋, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータのための拡張性を有する制御系の構成, 平成26年電気関係学会関西連合大会講演論文集, 2014, 査読無, G4-7

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制およびキャパシタ電圧バランス制御に関する検討, *パワーエレクトロニクス学会誌* Vol.39, 2014, 査読無, p.199

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制とキャパシタ電圧平衡制御, 平成26年電気学会全国大会論文集, 査読無, 第4分冊, 2014, 査読無, p.66-67

伊藤満孝, 犬伏恵滋, 沢崎遼馬, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの制御特性評価, 半導体電力変換モータドライブ合同研究会, 2014, 査読無, SPC-14-029, MD-14-029

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制, 平成25年電気関係学会関西連合大会講演論文集, 2013, 査読無, G4-2

伊藤満孝, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史, モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの可変電圧・可変周波数運転における特性評価, *パワーエレクトロニクス学会誌* Vol.38, 2013, 査読無,

水谷友哉, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, 空間ベクトル変調法を用いた n レベルモジュラーマトリックスコンバータの制御, 電気学会半導体電力変換研究会, 2013, 査読無, SPC-13-016

[学会発表](計15件)

三浦友史, 犬伏恵滋, 伊藤満孝, 伊瀬敏史, “Multilevel modular matrix converter for high voltage applications: Control, design and experimental characteristics,” Annual conference of the IEEE industrial electronics society, IECON 2014, 平成 26 年 11 月 1 日, ダラス (アメリカ)

三浦友史, 水谷友哉, 伊藤満孝, 伊瀬敏史, “Modular multilevel matrix converter for low frequency AC transmission,” IEEE international conference on power electronics and drive systems, PEDS 2013, 平成 25 年 4 月 24 日, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市)

三浦友史, 水谷友哉, 伊藤満孝, 伊瀬敏史, “A novel space vector control with capacitor voltage balancing for a multilevel modular matrix converter,” IEEE energy conversion congress & exposition, ECCE Asia downunder 2013, 平成 25 年 6 月 5 日, メルボルン (オーストラリア)

吉田知明, 藤川拓也, 犬伏恵滋, 三浦友史, 伊瀬敏史, 階層化された制御系をもつモジュラーマトリックスコンバータの非同期・遅延動作の影響評価, 電気学会全国大会, 平成 27 年 3 月 26 日, 東京都市大学 (東京都世田谷区)

犬伏恵滋, 吉田知明, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, キャパシタ電圧の平衡化を行うマルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧制御方式, 電気学会半導体電力変換モータドライブ合同研究会, 平成 27 年 1 月 24 日, 大阪工業大学 (大阪府大阪市)

吉田知明, 藤川拓也, 犬伏恵滋, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの階層化された制御系の検討, パワーエレクトロニクス学会第 206 回研究会, 平成 26 年 12 月 20 日, 同志社大学 (京都府京都市)

犬伏恵滋, 吉田知明, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, 5 レベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制- 実験による特性検証 -, 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, 平成 26 年 11 月 23 日, 奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県生駒市)

吉田知明, 犬伏恵滋, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータのための拡張性を有する制御系の構成, 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, 平成 26 年 11

月 23 日, 奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県生駒市)

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧制御とキャパシタ電圧平衡制御, 平成 26 年電気学会全国大会, 平成 26 年 3 月 18 日, 愛媛大学 (愛媛県松山市)

伊藤満孝, 犬伏恵滋, 沢崎遼馬, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの制御特性評価, 半導体電力変換モータドライブ合同研究会, 平成 26 年 1 月 25 日, 神戸大学 (兵庫県神戸市)

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制およびキャパシタ電圧バランス制御に関する検討, パワーエレクトロニクス学会第 201 回研究会, 平成 25 年 12 月 14 日, 大阪工業大学 (大阪府大阪市)

犬伏恵滋, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, マルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの零相電圧抑制, 平成 25 年電気関係学会関西連合大会, 平成 25 年 11 月 16 日, 大阪電気通信大学 (大阪府寝屋川市)

伊藤満孝, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史, モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの可変電圧・可変周波数運転における特性評価, パワーエレクトロニクス学会第 196 回研究会, 平成 25 年 12 月 15 日, 奈良工業高等専門学校 (奈良県大和郡山市)

水谷友哉, 伊藤満孝, 三浦友史, 伊瀬敏史, 空間ベクトル変調法を用いた n レベルモジュラーマトリックスコンバータの制御, 電気学会半導体電力変換研究会, 平成 25 年 1 月 26 日, 同志社大学 (京都府京都市)

伊藤満孝, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史, モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの可変電圧・可変周波数の運転特性, 平成 25 年電気学会全国大会, 平成 25 年 3 月 22 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 友史 (MIURA, Yushi)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90354646

(2) 研究分担者

伊瀬 敏史 (ISE, Toshifumi)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00184581