

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360107

研究課題名(和文)マトリックスコンバータのPWM制御理論の体系化と可視化

研究課題名(英文)Schematization and Visualization of PWM Strategies of a Matrix Converter

研究代表者

竹下 隆晴(Takeshita, Takaharu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70171634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：交流可変速モータの駆動用電源として、交流電源電圧を可変電圧可変周波数の交流電圧に直接変換する高効率、高密度の電力変換器であるマトリックスコンバータが注目されている。マトリックスコンバータのPWM制御法は複雑で体系化されていない。

本研究では、高調波を抑制するPWM制御を導出し、制御法の体系化をすると共に、図による可視化したPWM制御を確立する。具体的には3項目「出力電圧高調波を低減するPWM制御理論の確立」、「入力電流高調波を低減するPWM制御理論の確立」、「PWM制御理論の可視化」を明かにした。本研究により、マトリックスコンバータのPWM制御法を簡単に理解でき、普及と実用化に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The matrix converter that can directly convert from the constant AC voltages of a power supply to AC voltages with variable voltage and variable frequency is attracted as a high-efficiency and high-power-density power converter. However, the PWM strategy has been not schematized due to the complex control method.

In this research, the PWM strategies for suppressing the harmonics are derived and schematized, and the visualized PWM strategies are developed. The research contents are three items of "Derivation of PWM strategy for reducing the output harmonic voltage", "Derivation of PWM strategy for reducing the input harmonic current" and "Visualization of PWM strategies". This research results contribute diffusion and practical realization because of easy understanding of the control method for the matrix converter.

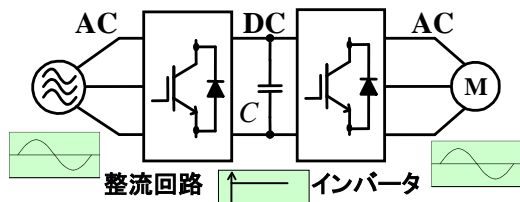
研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：低消費電力・高エネルギー密度 省エネルギー パワーエレクトロニクス 電気機器工学 マトリックスコンバータ 可視化 電力変換器

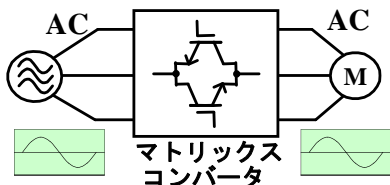
1. 研究開始当初の背景

産業分野では、電力の約7割が機械等を駆動するためのモータで消費されており、モータ駆動装置における省エネルギー、高効率、高密度化が、地球規模での環境問題からも重要になってきている。省エネルギーに欠かせない交流モータの可変速駆動装置は、図1(a)の従来構成に示すように、商用交流電源を直流に変換する整流回路と、直流を任意の振幅と周波数の交流に再変換するインバータの組み合わせで実現される。この場合、整流回路とインバータの2台の電力変換器が必要になり、2回の電力変換により損失も増える。また、直流部の大容量電解コンデンサが装置体積の約4割を占めるので装置が大型になると共に、電解コンデンサの耐用年数が他の部品に比較して短いため信頼性が低下する。

このような状況の中で、図1(b)に示す商用三相交流電源を可変電圧、可変周波数の三相交流に直接変換すると同時に、入力電源電流を力率1の正弦波波形に制御できる三相/三相マトリックスコンバータの研究が世界的に注目されている。マトリックスコンバータは、電解コンデンサ等のエネルギー蓄積素子を用いないので小型化でき、さらに、逆阻止スイッチング素子を使用することで、電源から負荷までの電流通過素子数が1個となり、変換器損失を低減できる。具体的には、マトリックスコンバータでは、整流回路とインバータとの組み合わせに比較して、体積および損失をともに約1/2に低減できる。このためパワーエレクトロニクス関係の国際会議では必ずセッションが生まれ、学術的に重要なテーマになっている。



(a) 従来構成 (整流回路・インバータ方式)



(b) 提案構成 (マトリックスコンバータ)

図1 交流-交流電力変換器

2. 研究の目的

図2は、三相/三相マトリックスコンバータの回路構成である。9個の双方向スイッチで入出力間が接続され、これらスイッチのオン

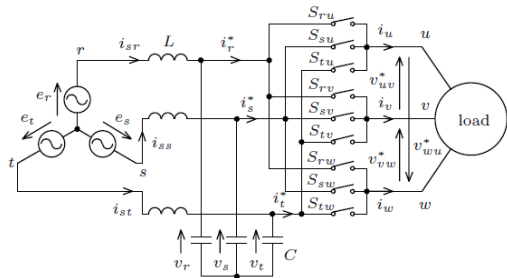


図2 三相/三相マトリックスコンバータ

/オフにより出力電圧と入力力率を指令値通りに同時制御する。各出力相で1個のスイッチをオンするので27(=3×3×3)種類のスイッチングパターンがあり、PWM制御の自由度が高く、さまざまな制御法が考えられ、PWM制御理論は複雑である。スイッチングパターン制御として、一般的に制御周期間に三相全体のスイッチング回数を6回とするPWM制御法が使用されている。変換器効率改善の面からスイッチング回数低減が重要であり、申請者は、マトリックスコンバータの制御において、従来の半分のスイッチング回数3回のPWM制御法を開発している。このスイッチング回数3回方式は、過去に例を見ない独創的なものである。また、瞬時実効値理論に基づいたリアルタイムPWMパターン評価法も開発している。これら論文により、出力電圧高調波の最小化と、入力電流高調波の最小化を確立している。しかしながら、これらの理論は複雑であり、他のPWM制御法との違いを簡単に説明できない状況にある。また、高調波最小化のPWMパターンの実現のためには、リアルタイム評価に高速なプロセッサを必要とする。高調波最小化パターンと電流符号に基づいた準最小化パターンの間には、評価結果に大きな差はなく、電流符号を用いることで簡単な処理で実現できる。そこで、マトリックスコンバータの普及と研究推進には、簡単に理解できるPWM制御法を導出し、PWM制御理論を体系化すると共に、図を用いて可視化された簡単なPWM制御法が必要であり、マトリックスコンバータのPWM制御理論の体系化と可視化を実施する。

3. 研究の方法

本研究では、三相/三相マトリックスコンバータのPWM制御法において、その動作を簡単に理解できる制御理論の確立を目的として、具体的に以下の3項目を実施する。

- (1) 出力電圧高調波を低減するPWM制御理論の確立 三相/三相マトリックスコンバータの制御周期間に三相全体のスイッチング回数を4および3回とする申請者が既に提案しているPWM制御法について、出力電圧高調波を低減する簡単なPWM制御理論への理論展開を確立する。

(2) 入力電流高調波を低減する PWM 制御理論の確立 三相/三相マトリックスコンバータにおいて、制御周期間に三相全体のスイッチング回数を 4 および 3 回とするそれぞれの PWM 制御法について、入力電流高調波を低減する簡単な PWM 制御理論を確立する。

(3) PWM 制御理論の可視化 基本となる出力電圧高調波および入力電流高調波をそれぞれ低減する PWM 制御理論の体系化をする。さらに、これら PWM 制御法を実現するための制御原理を、図を用いて可視化する。ここでの可視化は、インバータ制御では指令正弦波電圧とキャリアの三角波の比較により PWM 制御パターンが得られるが、これと同様な図で簡単に制御原理を理解できる PWM 制御法を導出する。これにより複雑とされるマトリックスコンバータの PWM 制御原理が明快になり、さまざまな PWM 制御法の比較を可能にする。

4. 研究成果

(1) 出力電圧高調波を低減する PWM 制御理論の確立 マトリックスコンバータの出力電圧高調波を低減する PWM 制御法として、制御周期間に三相全体のスイッチング回数を 4 回とする全てのスイッチングパターンを導出し、出力電圧高調波およびスイッチング損失を低減する出力電流符号に基づいた簡単な PWM 制御法を明らかにしている。図 2 のマトリックスコンバータの入力相 r, s, t のうち、電圧値の最大、中間、最小相をそれぞれ、 a, β, γ とする。また、出力電圧相 u, v, w のうち、電圧指令値の最大、中間、最小相をそれぞれ、 a, b, c とする。制御周期 T_s 間のスイッチング回数 4 回とする全てのデューティ組み合わせとして、図 3 に示すように図 (a) の出力中間相電流 i_β の符号が正のときには、デューティ組み合わせ A, B, C の 3 種類が、図 (b) の出力中間相電流 i_β の符号が負のときには、デューティ組み合わせ A, D, E の 3 種類が、それぞれ存在することを明らかにしている。デューティ組み合わせ A を用いるパターンを制御法①、デューティ組み合わせ B と D

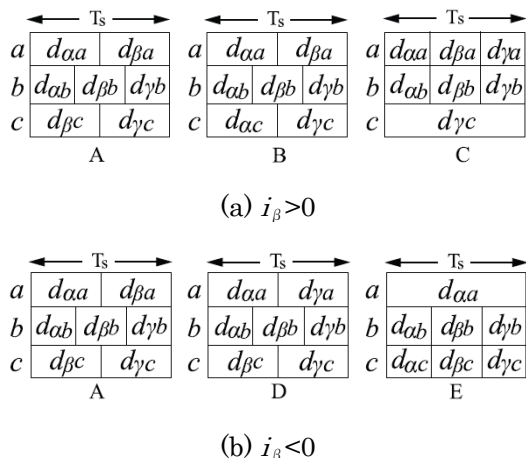


図 3 三相/三相マトリックスコンバータ

を用いるパターンを制御法②、デューティ組み合わせ C と E を用いるパターンを制御法③として、それぞれの制御法の出力電圧高調波およびスイッチング損失を比較する。図 4 は、1 制御周期間の出力線間電圧波形で、制御法①の出力電圧リップルと高調波電圧が共に低いことがわかる。

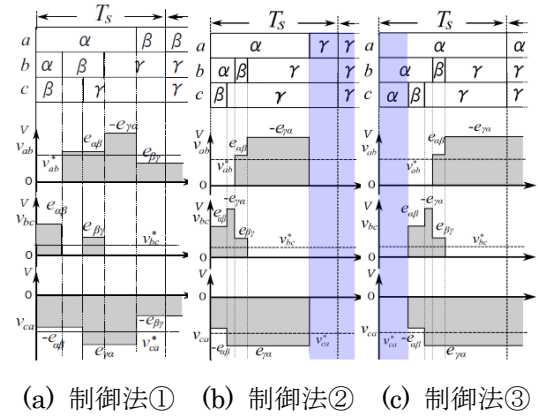


図 4 1 制御周期間の出力電圧波形

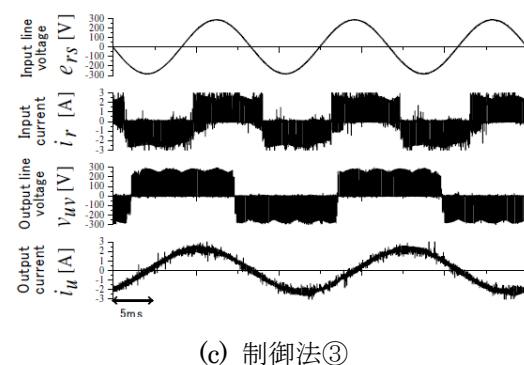
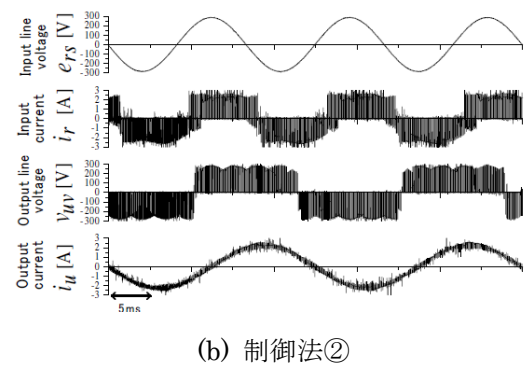
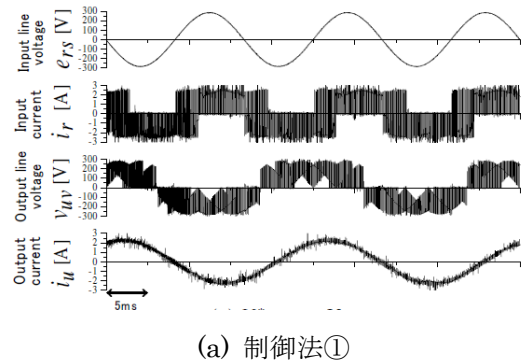
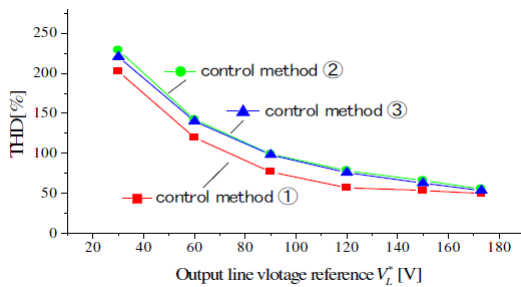


図 5 各制御法の動作波形

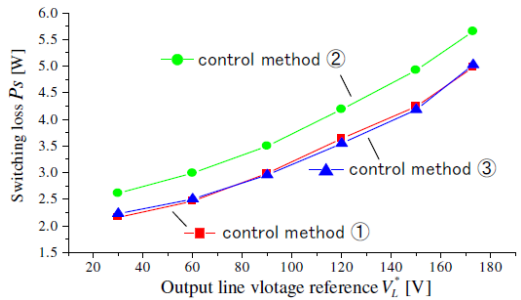
図4の制御法①と③では、制御周期間に $\alpha\beta$ 間と $\beta\gamma$ 間の転流がそれぞれ2回あり、すべての転流で入力線間電圧の低い線間の転流をしている。図4の制御法②では、制御周期間の4回の転流のうち、1回の転流は $\alpha\gamma$ 間の最大入力線間電圧の転流になる。したがって、制御法①と③は制御法②に比較してスイッチング損失が低くなると考えられる。

図5は、実験による各制御法の動作波形を示しており、図(a)の制御法①では、出力電圧 v_{uv} は零まで電圧が下がっていない部分が存在し、高い入力電圧パルスで構成されている。図(b)の制御法②および図(c)制御法③では、出力電圧 v_{uv} は零まで電圧が下がっており、高調波成分が高いことがわかる。

図6は、図(a)出力電圧の総合ひずみ率(THD)と図(b)スイッチング損失の各制御法の比較であり、出力電圧の総合ひずみ率およびスイッチング損失とも制御法①が最も低く優れている。以上により、理論および実験結果から出力電圧高調波低減制御として制御法①が優れていることを明らかにしている。



(a) 出力電圧の総合ひずみ率(THD)特性



(b) スイッチング損失特性

図6 総合ひずみ率とスイッチング損失

(2) 入力電流高調波を低減するPWM制御理論の確立 マトリックスコンバータの入力電流高調波を低減する制御法として、出力電圧相 u, v, w のうち、電圧指令値の最大、中間、小相をそれぞれ、 a, b, c とし、それぞれの電流 i_a, i_b, i_c の表1の大小関係に基づいて、スイッチングパターンを選択する簡単な制御法を提案している。表1により、(I)~(VIII)の状態を検出する。この状態にしたがって、表2を用いて図7のスイッチングパターンを選択する。

表1 出力電流の符号および大小関係

| symbol | i_a | i_b | i_c | relation |
|--------|-------|-------|-------|-------------------------|
| (I) | + | + | - | $i_a \geq i_b \geq i_c$ |
| (II) | + | - | - | |
| (III) | + | + | - | $i_b \geq i_a \geq i_c$ |
| (IV) | - | + | - | |
| (V) | + | - | - | $i_a \geq i_c \geq i_b$ |
| (VI) | + | - | + | |
| (VII) | - | + | - | $i_b \geq i_c \geq i_a$ |
| (VIII) | + | - | + | $i_c \geq i_a \geq i_b$ |

表2 提案パターンの選択

| switching pattern | condition of output currents |
|-------------------|------------------------------|
| A | (I) |
| B | (II) |
| C | (III), (IV), (VII) |
| D | (V), (VI), (VIII) |

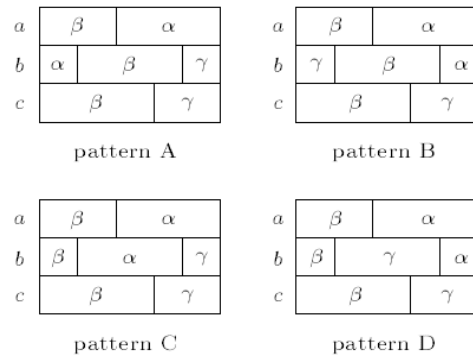
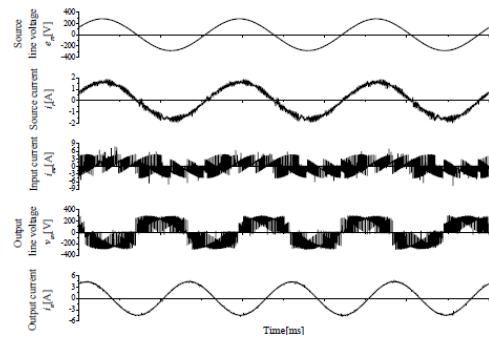
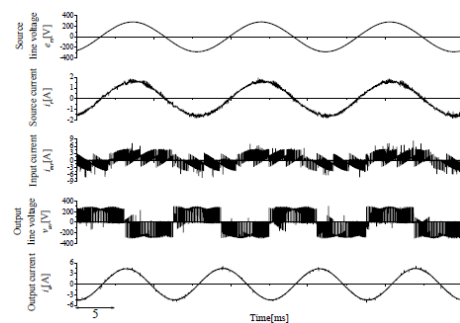


図7 提案パターン



(a) 従来制御法



(b) 提案制御法

図8 入力電流高調波低減実験波形

図 8 は、実験による従来制御法と提案制御法の動作波形を示している。提案制御法は、従来制御法に比較して、入力電流波形 i_r の高調波が低減されている。高調波解析をすると、スイッチング周波数 5kHz 成分の高調波電流は、基本波に対して、従来制御法 45.8%、提案制御法 21.4%で、提案制御法では従来制御法の 1/2 以下に低減されている。

(3) PWM 制御理論の可視化 マトリックスコンバータの PWM 制御法は、スイッチング周期の波形について議論をされ、電源や負荷の 1 周期の波形については、明確になっていない。電源や負荷の周期での動作波形を明確にし、PWM 制御法の制御原理を容易に理解および比較できるように、図を用いて PWM 制御動作を可視化する。図 9 は、1 制御周期間にスイッチング回数 4 回の出力電圧高調波を低減する PWM 制御法を、スイッチング周波数を低くして可視化した図である。出力電圧を定格から零に低減する過渡時の波形であり、出力電圧や入力電流の過渡現象も表されている。

図 10 は、スイッチング周波数を 10kHz に上げて、その他の条件は図 9 の過渡現象と同じとした実験波形である。スイッチング周波数が高いため、電圧や電流の詳細な動作は明確ではないが、図 10 と同様の波形が得られている。もし、実験的な問題があれば、図 10 の可視化された波形においても同様の波形

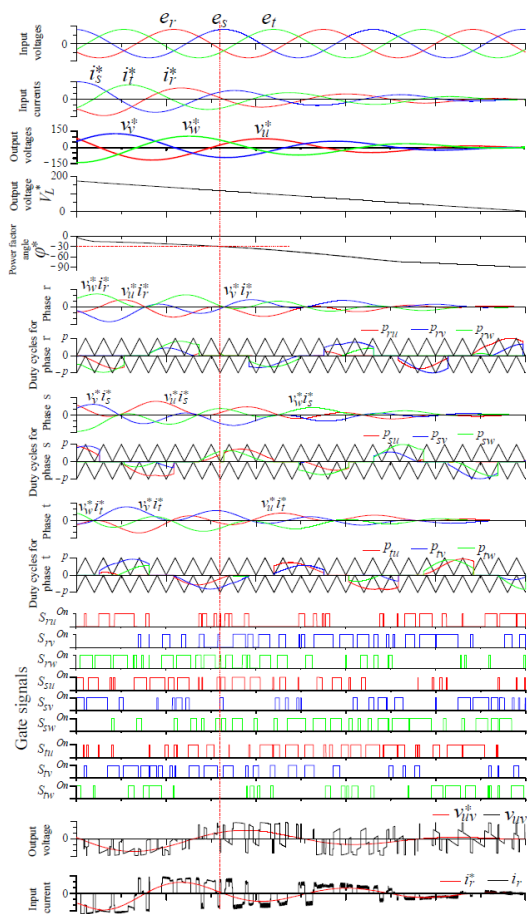


図 9 過渡状態の可視化された PWM 制御

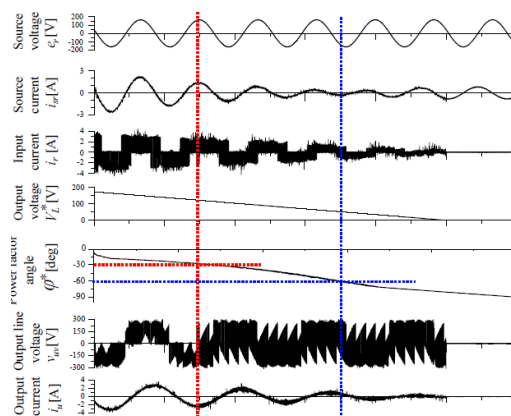


図 10 図 9 に対応した実験波形

が得られ、その原因や解決法を容易に見いだすことができる。また、マトリックスコンバータのさまざまな PWM 制御法を同様に可視化することでそれぞれの制御法の得失を明確にできる。

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 8 件)

- ① 渡辺章太, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの高入力力率における出力電圧高調波低減パターンの評価」, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol.135, No.1, 2015, pp.19-26
DOI:10.1541/ieejias.135.19
- ② Shota Watanabe, Takaharu Takeshita, "Evaluation of PWM Patterns of a Matrix Converter for Reduction of Output Voltage Harmonics", The 16th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), The 16th International, 査読有, 511, 2014, pp.1372-1377
DOI:10.1109/EPEPEMC.2014.6980668
- ③ Inami Asai, Takaharu Takeshita, "Visualization of PWM Waveforms of Output Voltage and Input Current for a Direct Matrix Converter", Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International, 査読有, 19P1-10, 2014, pp.123-129
DOI:10.1109/IPEC.2014.6869569
- ④ 浅井石南, 竹下隆晴, 「直接型マトリックスコンバータの入出力電圧周期における PWM 制御の可視化」, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol.134, No.1, 2014, pp.49-58
DOI:10.1541/ieejias.134.49
- ⑤ Mahmoud A. Sayed, Takaharu Takeshita, "Novel PWM Technique for Three-to-Five Phase Matrix Converter", 査読有, Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013

International Conference on, 231, 2013, pp.644-649

DOI:10.1109/ICRERA.2013.6749834

- ⑥ 浅井石南, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータのスイッチング損失と出力電圧高調波を低減する PWM 制御」, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol.133, No.1, 2013, pp.1-9

DOI:10.1541/ieejias.133.1

- ⑦ Yuya Fujishima, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita, "Input LC Filter Design of Bi-directional AC/DC Converter", 査読有, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on, 2012, pp.1-6

ISBN: 978-1-4673-2327-7

http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6402017&tag=1

- ⑧ Takaharu Takeshita, Hiromitsu Fukagawa, "Output Current Signs-Based PWM Strategy of Matrix Converters for Reducing Input Current Harmonics", 査読有, Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, LS5c.3, 2012, pp.1-6

DOI:10.1109/EPEPEMC.2012.6397478

[学会発表] (計 10 件)

- ① 瀧田真也, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの入力電流高調波低減のための可視化 PWM 制御」, 電気学会産業応用部門大会, 2014 年 8 月 26 日~28 日, 東京電機大学 (東京都)

- ② 渡辺章太, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの全入力力率における出力電圧高調波低減 PWM 制御の評価」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2014 年 7 月 10 日~11 日, 広島工業大学 (広島市)

- ③ 渡辺章太, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの高力率時におけるスイッチングパターンの評価」, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 2014 年 1 月 24 日~25 日, 同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)

- ④ Yuncheng Meng, Takaharu Takeshita, "An Efficient PWM Strategy of Matrix Converter for Suppressing Input Current Harmonics under Reducing Number of Commutations", 2013 Korea-Japan Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2013 年 10 月 12 日, Nagoya Institute of Technology (Nagoya)

- ⑤ 孟云程, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの転流回数低減における入力電流高調波の抑制制御法」, 電気学会産業応用部門大会, 2013 年 8 月 28 日~30 日, 山口大学 (山口市)

- ⑥ 渡辺章太, 浅井石南, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの転流回数低減における電源力率の制御範囲拡大」, 平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 3 月 20 日~22 日, 名古屋大学 (名古屋市)

- ⑦ 浅井石南, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの PWM 制御の可視化」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2013 年 1 月 25 日~26 日, 同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)

- ⑧ Yuncheng Meng, Takaharu Takeshita, "PWM Strategy of Matrix Converter for Suppressing Input Current Harmonics under Reducing Number of Commutations", 2012 Korea-Japan Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2012 年 11 月 2 日~3 日, POSCO International Center (Pohang, Korea)

- ⑨ 孟云程, 竹下隆晴, 「マトリックスコンバータの転流回数低減における入力電流高調波を抑制する PWM 制御法」, 平成 24 年電気関係学会東海支部連合大会, 2012 年 09 月 24 日~25 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県豊橋市)

- ⑩ 藤島優也, 北川亘, 竹下隆晴, 「双方向 AC/DC コンバータの入力 LC フィルタ設計」, 電気学会 半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 2012 年 6 月 8 日~9 日, 苫小牧工業高等専門学校 (北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHITA Takaharu)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70171634