

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360130

研究課題名（和文）マトリックスコンバータの回路構成と統一 PWM 制御理論

研究課題名（英文）Circuit Topologies and General PWM (Pulse Width Modulation) Theory of Matrix Converters

研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHI TA TAKAHARU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70171634

研究成果の概要（和文）：交流モータの可変速駆動装置などに用いられる交流-交流電力変換器において、高効率、高電力密度のマトリックスコンバータが次世代変換器として注目されている。マトリックスコンバータでは、出力電圧及び入力電流を制御する一般的な PWM 制御法が確立されていない。申請者が既に提案している損失低減のためのスイッチング回数低減制御と、出力電圧波形の高調波評価法を発展させ、3種類のマトリックスコンバータ回路の統一的な PWM 制御法を導出し、その制御特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：An ac to ac power converter is used for the variable-speed ac-motor drive system. Matrix converters are developed for ac to ac power converters with high efficiency and high power density in the next generation. However, the general PWM control scheme for controlling the output voltage and the input current of the matrix converter has not established. In this study, the general PWM control scheme for three circuit configurations of the matrix converters has been derived using the reduction control of the number of commutations and the evaluation method of the output voltage harmonics. The control characteristics in experiments are shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

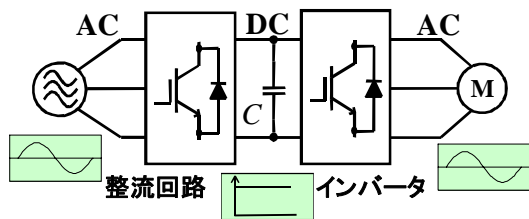
科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電気機器工学

キーワード：パワーエレクトロニクス，低消費電力・高エネルギー密度，省エネルギー，電力変換，PWM 制御

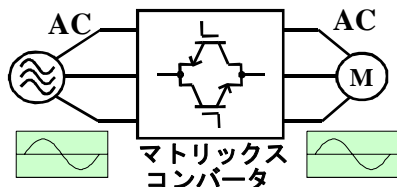
1. 研究開始当初の背景

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。図1は、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における、商用周波数の交流をモータが必要とする任意の交流電圧に変換する交流-交流電力変換器である。図1(a)は整流回路・インバータ方式で、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



(a) 整流回路・インバータ



(b) マトリックスコンバータ

図1 交流-交流電力変換器

数の交流に再変換するインバータの組み合わせである。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 C 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信頼性が低下する。

このような状況の中で、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図1(b)の三相/三相マトリックスコンバータ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が実現でき、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。

2. 研究の目的

図1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/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 $27(=3 \times 3 \times 3)$ 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、決定的な制御法が確立していない。このような中で、スイッチングパターン制御として、一般的

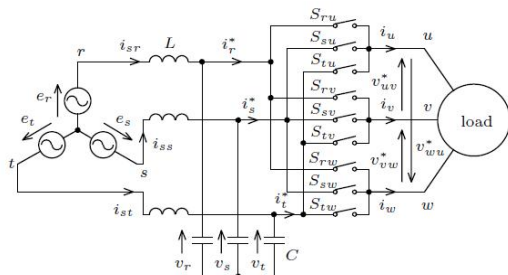


図2 三相/三相マトリックスコンバータ

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を、スイッチング回数4回および3回で実現するPWM制御法を、それぞれ提案している。

これら制御をもとに、マトリックスコンバータの出力電圧高調波または入力電流高調波を低減する制御の研究を進めていく中で、マトリックスコンバータの応用回路構成においても、今まで回路構成ごとに議論されていたPWM制御法を、統一的な理論へと展開できることに気づき、今回の申請である統一PWM制御理論の提案に至った。具体的には、三相/三相マトリックスコンバータ、単相/三相マトリックスコンバータ、マトリックスコンバータ/インバータハイブリッドシステムの3回路構成における統一PWM制御理論を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 三相/三相マトリックスコンバータ

マトリックスコンバータの統一PWM制御理論の基礎となる制御法として、制御周期間の三相全体のスイッチング回数を3回とするPWM制御法の成立する全てのPWMパターンを導出する。出力電圧高調波または入力電流高調波を低減するPWM制御法を導出し、シミュレーションおよび試作システムを用いた実験で、制御特性を明らかにする。

スイッチング回数3回のPWM制御法においては、スイッチング損失低減の観点からスイッチング回数低減を優先させたが、スイッチング回数3回のPWM制御法の考え方のもと、スイッチング回数を1回増やし、その自由度を用いて出力電圧高調波および入力電流高調波を低減することができ、スイッチング回数4回の統一PWM制御理論を確立する。さらに、シミュレーションと実験で提案法の有効性を検証する。

(2) 単相/三相マトリックスコンバータ

単相/三相マトリックスコンバータは、通常、三相/三相マトリックスコンバータとは異なるものとして扱われるが、入力電流指令

値の大きさと位相が電源周波数で変化する三相/三相マトリクスコンバータとして扱えることに着目して、三相/三相マトリクスコンバータ統一PWM制御理論にしたがって、単相/三相マトリクスコンバータのPWM制御法を導出する。本提案法による単相/三相マトリクスコンバータの電圧利用率の改善効果を明らかにし、シミュレーションと実験で特性を確認する。さらに、スイッチング回数を4回から3回にする改善効果をシミュレーションで明らかにする。

(3) マトリクスコンバータ/インバータハイブリッドシステム

三相マトリクスコンバータとインバータとの並列形ハイブリッドシステムにおいて、両変換器の同時動作時におけるマトリクスコンバータのPWM制御法を明らかにする。三相/三相マトリクスコンバータにおいて、電圧波形が方形波PWM波形とした解析となり、統一PWM制御理論にしたがって、PWM制御法を導出する。導出した制御法の制御特性をシミュレーションと実験で確認する。

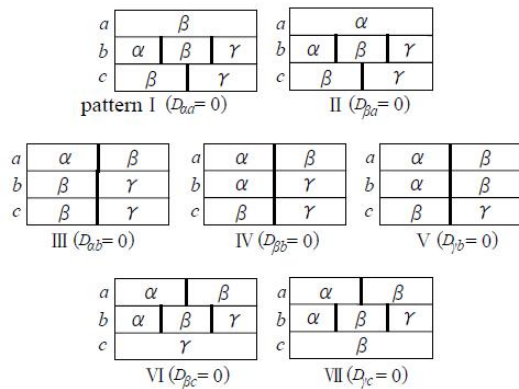
4. 研究成果

(1) 三相/三相マトリクスコンバータ

マトリクスコンバータの統一PWM制御理論の基礎となる制御法として、制御周期間の三相全体のスイッチング回数を3回とするPWM制御法の成立する全てのPWMパターンを導出した。図2のマトリ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、 α, 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



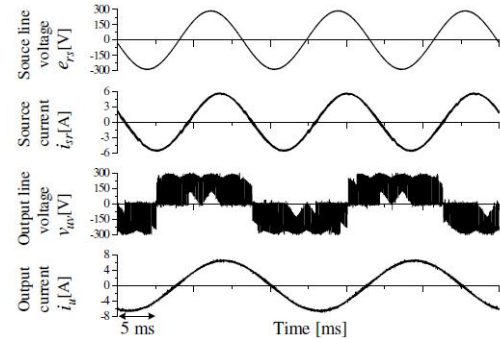
(a) 6回のパターン (b) 4回のパターン



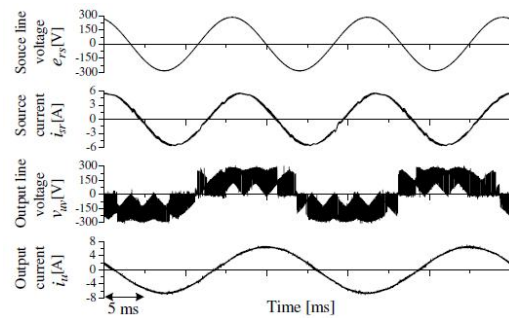
(c) 3回のパターン

図3 スwitchング回数低減パターン

る。制御周期間のスイッチング回数を、図3(a)の従来法の6回から図(b)の4回に低減する方式、さらには、出力電流情報を用いてスイッチングパターンを計算することで、図(c)の3回に低減する方式を開発した。図(c)の3回のパターンは、図(b)のいずれか1つのスィ

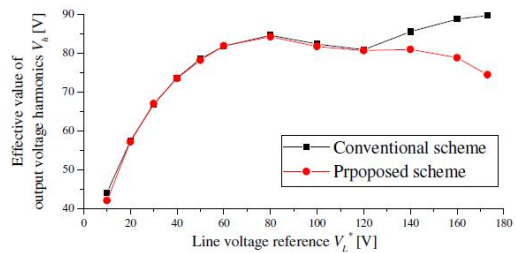


(a) 従来制御法 (スイッチング回数4回)

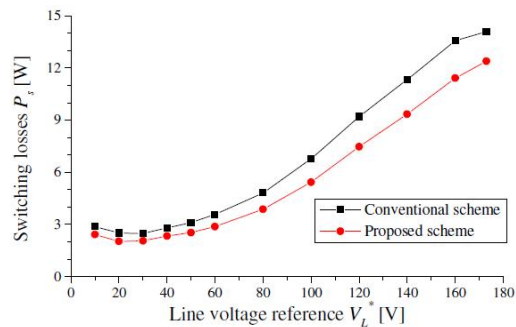


(b) 提案制御法 (スイッチング回数3回)

図4 出力電圧低減制御の実験波形



(a) 出力電圧の高調波実効値



(b) スwitchング損失

図5 出力電圧高調波とスィッチング損失

ッチ接続を零にしたもので、7パタンの内、常に2パタンが成立することを明らかにした。この2パタンの内、瞬時実効値理論を用いて出力電圧高調波の低いパタンを選択することで、高調波による電圧ひずみと損失を低減する制御法を採用した。図4は、試作システムを用いた実験結果で、図(a)は、従来制御法のスイッチング回数4回の波形で、図(b)は提案制御法のスイッチング回数3回の波形である。図(a)、(b)において、出力電流および入力電流共に正弦波波形が得られ、良好な制御が実現できている。提案制御法の出力電圧波形の変化幅が、従来制御法に比較して低減されており、出力電圧高調波が低減されていることがわかる。図5は実験特性で、図(a)に出力電圧高調波実効値を従来法と提案法で比較しており、提案法の方が、スイッチング回数を減らしているにも関わらず、高調波実効値も低くできている。図5(b)はスイッチング損失の特性で、提案法の損失を、従来法の約3/4に低減できている。

従来法の4回スイッチングのパタンは一意に決まり自由度のないパタンで、このパタンとは異なり、スイッチング回数3回方式を4回にして自由度を増やし、出力電圧高調波最小化を瞬時実効値理論に基づいて導出した。図6は、出力電圧高調波最小化の実験波形であり、スイッチング回数3回方式に比較してさらに高調波電圧を数%低減できた。

(2) 単相/三相マトリックスコンバータ

図7に単相/三相マトリックスコンバータの回路構成を示す。電源の高効率化と電源電流の低減のために、単相電源を力率1で制御する。電源の瞬時電力は電源周波数の2倍で脈動し、一方、出力瞬時電力は一定値になる

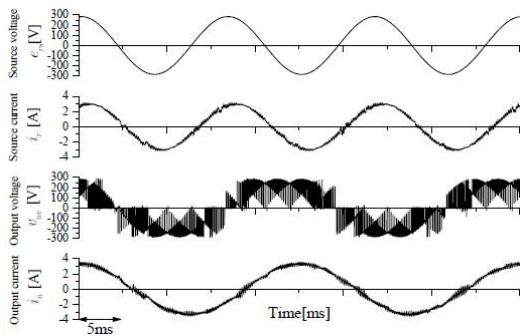


図6 出力高調波電圧最小化制御

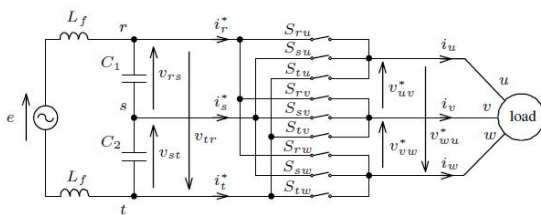


図7 単相/三相マトリックスコンバータ

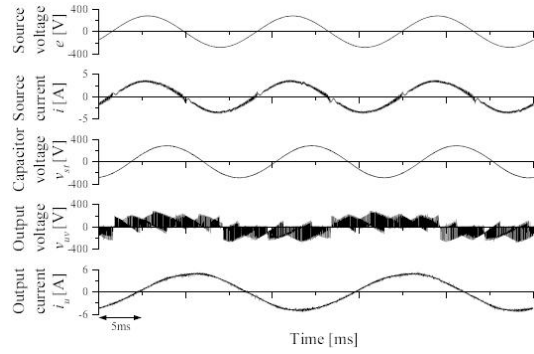


図8 単相/三相マトリックスコンバータの実験波形

ので、その差の瞬時電力をキャパシタ C_1 , C_2 を用いて補償する。出力制御範囲を広くするには、キャパシタ C_1 , C_2 のいずれかを零、すなわち、1つのキャパシタとすればよいことを明らかにした。

三相/三相マトリックスコンバータの PWM 制御理論を単相/三相マトリックスコンバータに適用するには、入力力率を時変系として扱うことで、そのまま適用できることを明らかにしている。これにより、三相/三相と単相/三相の両マトリックスコンバータを統一的に扱える理論を構築した。

図8は、単相/三相マトリックスコンバータの実験波形である。瞬時電力補償キャパシタ電圧を正弦波状に制御することで、出力電流の正弦波波形制御、入力電流波形の力率 1

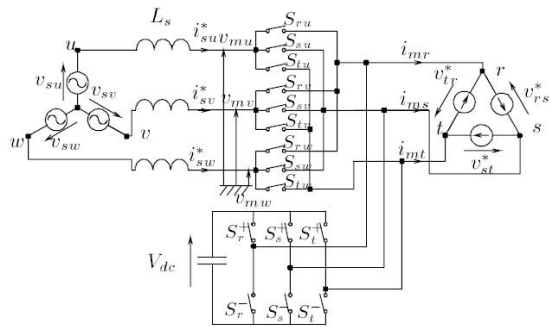


図9 マトリックスコンバータ/インバータハイブリッドシステム

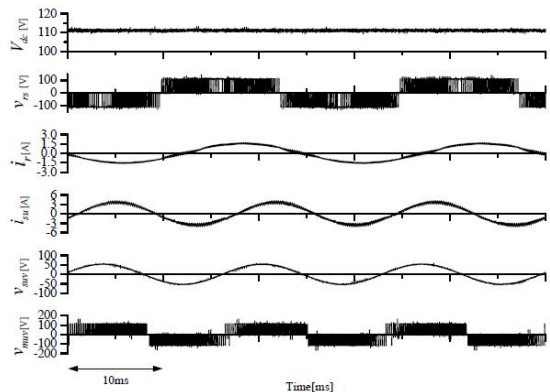


図10 ハイブリッドシステムの実験波形

の正弦波波形制御を実現している。

(3) マトリクスコンバータ/インバータハイブリッドシステム

図9は、ハイブリッドカーの発電機、蓄電池、モータの電力変換器の低損失化を図るための、マトリクスコンバータ/インバータハイブリッドシステムの構成である。インバータは、通常の制御法でモータを制御し、マトリクスコンバータは、入力電圧と出力電流を制御するが、このとき、制御周期間の三相全体のスイッチング回数を2回にまで低減できる制御法を導出した。これは、三相/三相マトリクスコンバータの制御法において、電圧波形が正弦波ではなく、インバータ出力波形の矩形波に適用した結果であり、ハイブリッドシステムにおいても統一的なマトリクスコンバータの制御理論を構築した。

図10は、ハイブリッドシステムの実験波形で、出力電流、入力電流を共に正弦波状にでき、直流キャパシタ電圧を一定値に制御でき、良好な波形が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Tomomi Yamashita, Takaharu Takeshita: " PWM Strategy and Its Output Control Range of Single-Phase to Three-Phase Matrix Converters" , 電気学会論文誌D, Vol.132, No.1, pp.42-49 (2012), 査読有
- ② 浅井石南, 竹下隆晴:「三相/三相マトリクスコンバータのデューティ比」, 電気学会論文誌D, Vol.131, No.9, pp.1173-1174 (2011), 査読有
- ③ 長谷川高之, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータの出力電圧高調波を最小化するPWM制御法」, 電気学会論文誌D, Vol.130, No.12, pp.1363-1370 (2010), 査読有
- ④ 竹下隆晴, 石川秀太, 安藤雄介:「瞬時実効値理論とマトリクスコンバータの出力電圧高調波抑制への応用」, 電気学会論文誌D, Vol.130, No.12, pp.1290-1297 (2010), 査読有

〔学会発表〕(計29件)

- ① 古橋雄介, 竹下隆晴:「単相/三相マトリクスコンバータの転流回数低減における出力電圧高調波最小化PWM制御法」, 電気学会 全国大会, 2012年3月22日, 広島工業大学 (広島県広島市)
- ② 由井直基, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータ・インバータ並列システムによるIPMSM駆動」, 電気学会 全国大会, 2012年3月22日, 広島工業大学 (広島県広島市)
- ③ 深川洋光, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータの入力電流高調波を低減する簡単

化PWM制御法」, 電気学会 半導体電力変換研究会, 2012年1月28日, 大阪大学 (大阪府吹田市)

- ④ 深川洋光, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータの入力電流高調波を低減する簡単化PWM制御法」, 電気学会 半導体電力変換研究会, 2012年1月28日, 大阪大学 (大阪府吹田市)
- ⑤ Yusuke Furuhashi, Takaharu Takeshita: "Single-Phase to Three-Phase Matrix Converter with Compensation for Instantaneous-Power Fluctuation", The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2011年11月8日, Crown Conference Centre (オーストラリアメルボルン)
- ⑥ Inami Asai, Takaharu Takeshita: "PWM Strategy of Matrix Converters for Minimizing Output Voltage Harmonics under Reducing Number of Commutations", The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2011年11月8日, Crown Conference Centre (オーストラリアメルボルン)
- ⑦ Takaharu Takeshita, Tomomi Yamashita: "Control of Single-Phase to Three-Phase Matrix Converters for PM Synchronous Motor Drive", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition Metropolitan Phoenix (ECCE), 2011年9月19日, Hyatt Regency Phoenix (米国 Phoenix)
- ⑧ 由井直基, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータ・インバータ並列システムにおけるインバータ出力電流低減法」, 電気学会 産業応用部門大会, 2011年9月8日, 琉球大学 (沖縄県中頭郡)
- ⑨ 古橋雄介, 竹下隆晴:「単相/三相マトリクスコンバータの瞬時電力脈動補償キャパシタの回路構成と容量設計」, 電気学会 半導体電力変換研究会, 2011年7月29日, 釧路市生涯学習センター (北海道釧路市)
- ⑩ 浅井石南, 竹下隆晴:「マトリクスコンバータのスイッチング損失および出力電圧高調波低減PWM制御」, 電気学会 半導体電力変換研究会, 2011年7月29日, 釧路市生涯学習センター (北海道釧路市)
- ⑪ Hiromitsu Fukagawa, Takaharu Takeshita: "PWM Strategy of Matrix Converters for Reducing Input Current Harmonics and Number of Commutations", 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia- (ICPE), 2011

- 年 6 月 1 日, The Shilla Jeju (韓国 済州島)
- ⑫ 古橋雄介, 山下知己, 竹下隆晴: 「单相/三相マトリックスコンバータの瞬時電力脈動補償回路の設計」, 電気学会全国大会, 2011 年 3 月 16 日, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ⑬ 浅井石南, 長谷川高之, 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出力電圧高調波最小化 PWM 制御法」, 電気学会全国大会, 2011 年 3 月 16 日, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ⑭ 一木智, 竹下隆晴: 「HEV 用マトリックスコンバータ・インバータ並列システムの制御」, 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研究会, 2011 年 3 月 7 日, 琉球大学 (沖縄県)
- ⑮ 山下知己, 竹下隆晴: 「单相/三相マトリックスコンバータによるモータ駆動」, 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研究会, 2011 年 3 月 7 日, 琉球大学 (沖縄県)
- ⑯ 深川洋光, 竹下隆晴: 「瞬時実効値評価によるマトリックスコンバータの入力電流高調波を低減する PWM 制御法」, 電気学会 電子デバイス・半導体電力変換合同研究会, 2010 年 11 月 29 日, 北海道立道民活動センター (北海道)
- ⑰ Takayuki Hasegawa, Takaharu Takeshita: "PWM Strategy of Voltage Harmonics Minimization for Matrix Converters", The 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2010 年 11 月 9 日, Renaissance Phoenix Glendale Hotel & Spa (Phoenix, USA)
- ⑱ Kotaro Deguchi, Takaharu Takeshita: "PWM Pattern Selection Method of Matrix Converters for Suppressing Input Current Harmonics", 2010 Korea-Japan Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2010 年 10 月 2 日, Hotel Illua (Busan, South Korea)
- ⑲ Takaharu Takeshita: "Output Voltage Harmonics Suppression of Matrix Converters Using Instantaneous Effective Values, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 年 9 月 14 日, Hilton Atlanta (Atlanta, USA)
- ⑳ 古橋雄介, 山下知己, 竹下隆晴: 「单相/三相マトリックスコンバータの電力脈動補償回路の設計」, 電気関係学会東海支部連合大会, 2010 年 8 月 31 日, 中部大学 (愛知県春日井市)
- ㉑ 出口好太郎, 竹下隆晴: 「出力電流符号によるマトリックスコンバータの入力電流高調波を低減する PWM 制御法」, 電気学会 産業応用部門大会, 2010 年 8 月 26 日, 芝浦工業大学 (東京都)
- ㉒ 一木智, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータ・インバータ並列システムの制御」, 電気学会 産業応用部門大会, 2010 年 8 月 26 日, 芝浦工業大学 (東京都)
- ㉓ Tomomi Yamashita, Takaharu Takeshita: "PWM Strategy of Single-phase to Three-phase Matrix Converters for Reducing a Number of Commutations", International Power Electronics Conference (IPEC), ECCE Asia, 2010 年 6 月 24 日, Sapporo Convention Center (北海道札幌市)
- ㉔ 山下知己, 竹下隆晴: 「電力脈動補償用キャパシタを用いた单相/三相マトリックスコンバータの電圧電流条件」, 平成 22 年電気学会全国大会, 2010 年 3 月 19 日, 明治大学 (東京都)
- ㉕ 長谷川高之, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの出力電圧高調波を最小化する PWM 制御法」, 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研究会, 2010 年 3 月 4 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ㉖ 山下知己, 竹下隆晴: 「单相/三相マトリックスコンバータの PWM 制御法」, 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研究会, 2010 年 3 月 4 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ㉗ Shintarou Tanaka, Takaharu Takeshita: "Control of Input Power Factor for Matrix Converters Reducing a Number of Commutations", The 12th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2009), 2009 年 11 月 17 日, タワーホール船堀 (東京都)
- ㉘ 田中伸太郎, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの転流回数と入力電流高調波を低減する PWM パターン選択法」, 電気学会 産業応用部門大会, 2009 年 9 月 1 日, 三重大学 (三重県津市)
- ㉙ Takaharu Takeshita, Shuta Ishikawa: "Unity Input Power-Factor Control of Three-Phase Matrix Converters", 2009 Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2009 年 6 月 27 日, ホテルエピナール那須 (栃木県那須郡)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHI TA TAKAHARU)
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 70171634