

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360106

研究課題名(和文)マトリックスコンバータ技術によるワイヤレス給電用電源の革新

研究課題名(英文)Innovations of wireless power transfer system using matrix converter technologies

研究代表者

伊東 淳一(Junichi, Itoh)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90377218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ワイヤレス給電システム向け電力変換器の低損失化、小型化、長寿命化を目指し、高周波で低損失に動作可能なマトリックスコンバータ(交流直接形電力変換器)の開発、マトリックスコンバータ向け単相電力脈動補償技術の開発、三相-単相マトリックスコンバータの高密度実装技術の確立を行なった。マトリックスコンバータに対してPDM(パルス密度変調)と、単相電力脈動補償技術を適用することで高効率化、小型化の可能性を示した。さらに、マトリックスコンバータに適したラミネートブスバーを設計することで高周波動作に適したマトリックスコンバータを実現できる見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：This report describes the outcomes of the study on an inductive wireless power transfer system using a matrix converter. The matrix converter is characterized by; (i) pulse density modulation (PDM), (ii) an active power decoupling function, (iii) a special design of a laminated bus-bar for a matrix converter. The PDM contributes a reduction of a switching loss because of ZVS. The circuit reduces the size of the power converter due to use of an active power decoupling technique with small capacitors. In (iii), the design method of a laminated bus-bar is developed. The validity of the design is confirmed by the comparison results between the simulation and the experimental results in term of a stray inductance and a heat rise of the bus-bar. The error of the stray inductance is 4.8% or less. From these results, it is confirmed that the matrix converter for an inductive power transfer can accomplish a reduction of power loss, downsizing and long lifetime.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 マトリックスコンバータ 高周波 PDM 脈動補償

1. 研究開始当初の背景

低炭素化社会実現のため、電気自動車の普及拡大が期待されている。電気自動車は航続距離が短いことから、こまめな充電作業が必要となる。しかし、現在の充電器には下記の問題がある。

- (1) ケーブルが重く、女性や高齢者にとってプラグの装着が難しい。
- (2) 雨天時に感電の危険が高まる。
- (3) 家庭で充電する際の充電忘れ。

これらの問題を解決する手法として磁気共鳴方式を用いたワイヤレス給電システムが盛んに研究されている。磁気共鳴方式を用いるためには13.56 MHzを出力可能な高周波電源が必要となる。しかしながら、現在産業用に用いられている電源は非常に高価であり、また、効率が悪いため大型である。

一方、交流を生成するために従来一般的に用いられているインバータの代わりとして、マトリックスコンバータがある。マトリックスコンバータは交流から交流に電力を直接変換する変換回路であり、従来インバータに対して低損失化、小型化、長寿命化が期待できる。しかしながら、マトリックスコンバータはモータ駆動及び風力発電などに応用されているものの、これまで高周波電源に対して応用された例はない。

2. 研究の目的

本研究は、電気自動車の普及拡大を目的とし、小型、低コストな電気自動車向け非接触充電器を開発することを目的とする。

本目的を達成するため、磁気共鳴方式によるワイヤレス給電システムに対し、高周波電源として電力脈動補償機能を有するマトリックスコンバータを適用する。さらに、このマトリックスコンバータの最適設計技術を確認することで、高周波動作可能な高密度実装技術を開発する。これにより、小型化・高効率化、低コスト化を実現可能であることを実験により明らかにする。

3. 研究の方法

小型・高効率・低コストを実現可能なワイヤレス給電向けマトリックスコンバータを開発するため、下記の3項目に分割して研究を実施した。(1)高周波の直接電力変換技術の検証、(2)単相電力脈動補償技術の検証、(3)高周波実装最適化技術の確立。以上より、単相電力脈動補償機能を有するマトリックスコンバータの評価を行い、課題を抽出する。

(1) 高周波の直接電力変換技術の検証

図2に本研究で取り組む高周波技術で中心的な役割を果たすPDM(パルス密度変調)の原理図を示す。マトリックスコンバータは通常PWM(パルス密度変調)により制御される。しかしながら、PWMではスイッチング損失がスイッチング周波数に比例して増加するため、高周波化に伴い損失が増大し、システ

ム全体の低効率化、大型化を招く。そこで本研究では、系統周波数50/60Hzに対してワイヤレス給電システムの駆動周波数が十分高いことに着目し、PDMを導入する。PDMを導入することで高周波電圧のゼロクロス点でスイッチング素子の転流を行うことが可能となる。スイッチング時の電圧がゼロの時にスイッチングを行えば、スイッチング損失もゼロとなるため、損失を低減できる。これにより高効率な電力変換技術が可能となる。本研究では、実際にマトリックスコンバータにPDM制御を導入し、提案制御により高効率な電力変換が可能であることを実験により検証する。

図3に提案する電流形ゲート駆動回路を示す。スイッチング素子を高周波でスイッチングする場合、ゲート駆動により生じるドライブ損失が周波数に比例して増加する問題がある。高周波動作時に生じる本損失を低減するため電流形ゲート駆動回路を開発し、その動作を検証する。

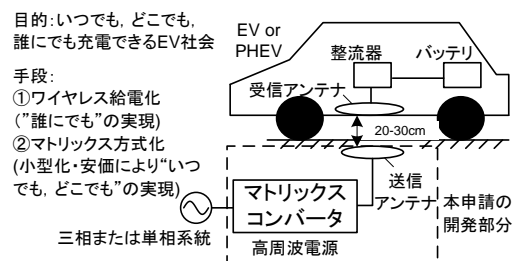


図1 本研究の概要

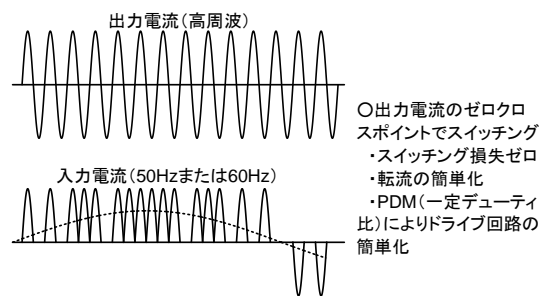


図2 PDM制御の原理図

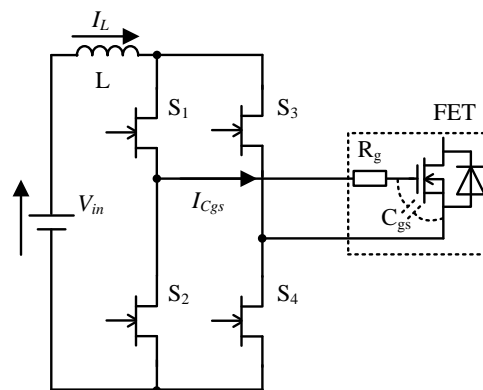


図3 ゲート駆動損失を低減可能な電流形ゲート駆動回路

電流形ゲート駆動回路は回生動作を用いることで、これまでターンオフ時にゲート抵抗で消費されていた電力を回生することで低損失化を図る。

(2) 単相電力脈動補償技術の検証

本研究では、単相電力脈動の補償方法を検討し、実験機により検証を行う。単相系統へ接続される回路では、入力電流を正弦波化すると出力周波数の2倍周波数で電力脈動が生じる。通常、大容量のキャパシタによりこの電力脈動を吸収するが、キャパシタは低寿命化及び回路の大型化の原因となる。そこで本研究では、バッファキャパシタの電圧を積極的に制御することで電力脈動を吸収する、電力脈動補償技術をマトリックスコンバータ向けに開発する。

図4に単相電力脈動を補償する原理を示す。出力電力は出力周波数の2倍周波数で脈動するため、バッファキャパシタの電圧を充放電することで電力の脈動を吸収する。積極的にキャパシタ電圧を変動させることで、従来よりも小容量のキャパシタで電力脈動を補償できる。

図5にPDM制御により動作するインダイレクトマトリックスコンバータに単相電力脈動補償機能を付与した回路を示す。マトリックスコンバータ部は前節と同様にPDM制御を適用する。一方、回路内の充電回路と放電回路をPWM制御することで C_{buf} の電圧を制御する。シミュレーションによりPDM制御と単相電力脈動補償回路の制御の統合が可能か検討を行う。

(3) 高周波実装最適化技術の確立

大容量の電力変換回路では、スイッチングデバイスやインダクタ、キャパシタ間を接続する配線として、ラミネートブスバー(導体の板)を用いる。ワイヤレス給電システムのような高周波システムでは、配線や部品配置によって生じる寄生インダクタンスや浮遊容量の影響が無視できない。そこで本研究では、ラミネートブスバーをマトリックスコンバータに適用するため、最適設計技術の確立を行う。

通常のインバータでは、直流部の正極と負極をラミネート化することで寄生インダクタンスの低減が可能となるが、マトリックスコンバータは直流部がなく、また、インバータとは電流経路が異なるため、最適なラミネートブスバーの構造が異なる。

本研究では三相-単相マトリックスコンバータに適するラミネートブスバーの最適設計技術を確立するため、電磁界解析を用いた解析を行う。その後、解析結果に基づいてラミネートブスバーを製作し、解析結果の妥当性を評価する。

4. 研究成果

(1) 高周波の直接電力変換技術の検証

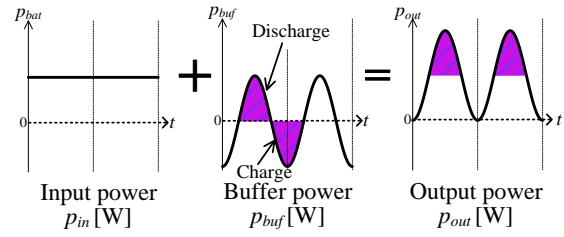


図4 単相電力脈動の補償原理

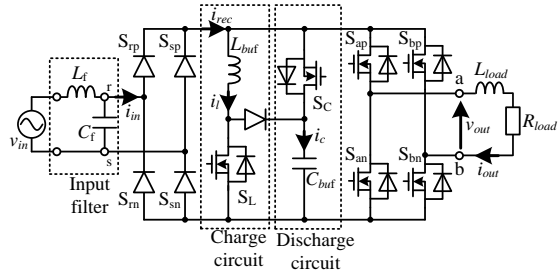
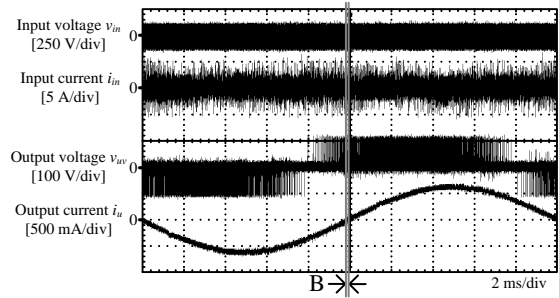
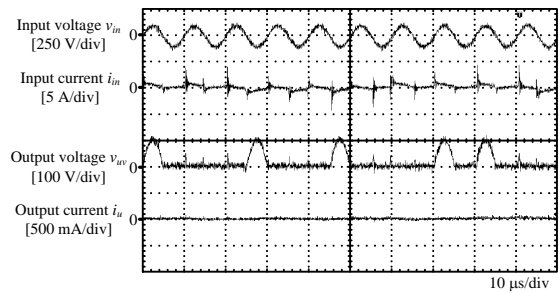


図5 単相電力脈動補償機能付きインダイレクトマトリックスコンバータ



(a) 入出力電圧



(b) (a)の拡大波形

図6 PDM制御適用時のマトリックスコンバータの動作波形

図6にPDM制御適用時のマトリックスコンバータの動作波形を示す。まず初めに、PDM制御をマトリックスコンバータに適用した場合の動作を検証するため、ミニモデルを作成し動作検証を行なった。検証の結果、PDM制御により正常に交流から交流への変換が可能であることを実験により確認した。なお、ここで入力周波数は100kHz、出力周波数は50Hzであり、変換効率は約94%である。図6より、マトリックスコンバータは入力電

圧のゼロクロス点付近でスイッチングできていることがわかる。以上の結果より、単相-単相マトリックスコンバータにおいても、同様に PDM 制御を適用できる見通しを得た。

次に、高周波スイッチング時のゲート駆動損失を低減するため、電流型ゲートドライブ回路を提案し、その動作検証を行なった。

図 7 に開発した電流形ゲート駆動回路の動作原理と、図 8 に試作機の動作波形を示す。従来の電圧形ゲート駆動回路と比較して、ゲート抵抗が不要である。本回路は MODE I の期間に L に充電したエネルギーを MODE II において FET のゲート-エミッタ間容量へ移行することで所望のゲート電圧を得る。ターンオフ時にも同様の動作を行い、FET のゲート-エミッタ間容量に充電された電荷を、電源側へ回生することで損失を低減する。

図 8 に従来の電圧形駆動回路と電流形ゲートドライブ回路(図 3)のドライブ損失の比較結果を示す。ここでは、スイッチング周波数を 100kHz から 1MHz まで上昇させ、各ゲートドライブ回路の消費電力を比較した。スイッチング周波数が 1MHz の時、ドライブ損失を 56.4%低減可能であることを実験により確認した。本検証では実験器の都合により最大スイッチング周波数を 1MHz としたものの、消費電力の低減割合は周波数の増加とともに大きくなる。したがって、ワイヤレス給電システムで必要となる 6MHz, 13.56MHz まで高周波化した場合、より大きな消費電力の低減効果が期待できる。以上より、本研究で開発した電流形ゲート駆動回路が高周波動作時の損失低減に有効であることを実験により確認した。

(2) 単相電力脈動補償技術の検証

マトリックスコンバータに適用する単相電力脈動補償回路と、その制御方法について検討を行い、シミュレーションによる検証を行なった。ここでは図 5 に示すように、インダirectマトリックスコンバータの DC リンク部に電力脈動補償回路を挿入した回路構成を取る。マトリックスコンバータ側は PDM により制御し、電力脈動補償回路は PWM により制御する。

シミュレーション結果より、整流器出力電流を 0.5p.u.一定に制御しつつ、正弦波出力が得られていることがわかる。以上より、マトリックスコンバータの PDM 制御と、電力脈動補償回路の PWM 制御が両立可能であることを確認した。

(3) 高周波実装最適化技術の確立

マトリックスコンバータでは、サージ電圧の原因となる寄生インダクタンスを最小とすべき電流パターンが、従来のインバータと異なる。そこで、マトリックスコンバータ特有の電流経路の寄生インダクタンスが許容値以下となるよう設計する必要がある。

図 11 に三相単相マトリックスコンバータ

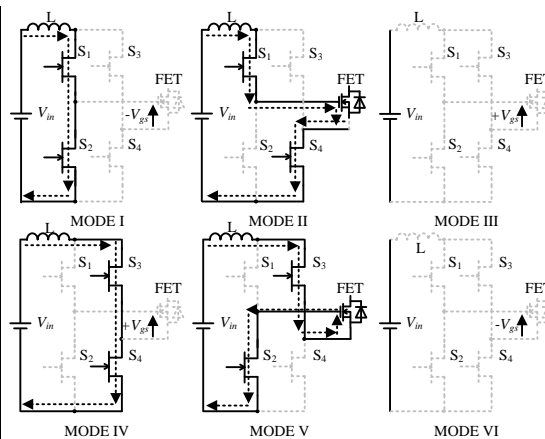


図 7 電流型ゲート駆動回路の動作原理

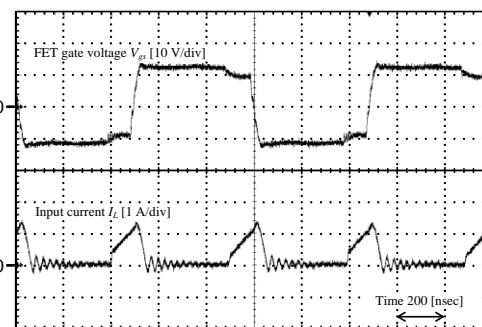


図 8 電流形ゲート駆動回路の動作波形

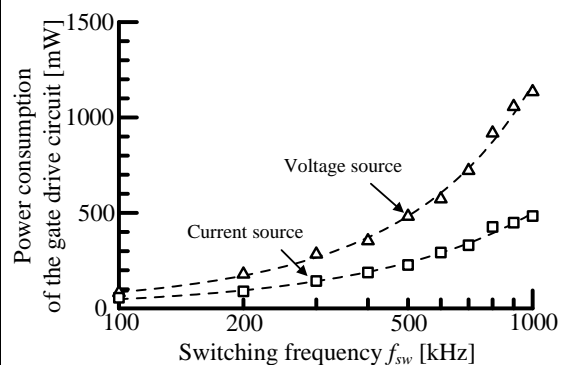


図 9 電流形ゲート駆動回路によるドライブ損失の低減

の回路図、図 12 にシミュレーションによる解析結果に基づいて製作したラミネートブスバーを示す。

シミュレーションを用いた設計法の妥当性を検証するため、寄生インダクタンスとブスバーの温度上昇についてシミュレーションと実験器の比較を行なった。

① 寄生インダクタンスの評価

図 13 に各電流経路における寄生インダクタンスのシミュレーション結果と実験により測定したインダクタンス値の比較結果を示す。結果より、寄生インダクタンスは、各入力層間の距離とフィルタキャパシタからスイッチング素子 S_{m1} , S_{sn} までの距離が短い場合に最小となることがわかる。なお、寄生

インダクタンスのシミュレーション結果と実験結果の誤差は4.8%であり、シミュレーションと実験結果が良好に一致していることを確認した。

② ブスバーの温度上昇の評価

図14にブスバーの温度上昇に関するシミュレーションと実験結果の比較を示す。実験結果とシミュレーション結果より、左部の一部を除いてシミュレーションと実験結果が良好に一致していることを確認した。なお、一致しない箇所は配線からの熱伝達によりシミュレーションでは考慮しない温度上昇が生じたことが原因である。

以上の結果より、シミュレーションを用いたブスバーの設計法の妥当性を確認し。

(4) 結論

以上のPDMを用いたマトリックスコンバータの制御と、電力脈動補償機能を有するマトリックスコンバータの制御法、高周波動作に適する電流形ゲートドライブ回路、ブスバーの設計法を組み合わせることで、高周波で動作可能なワイヤレス給電向けマトリックスコンバータを実現できる見通しを得た。

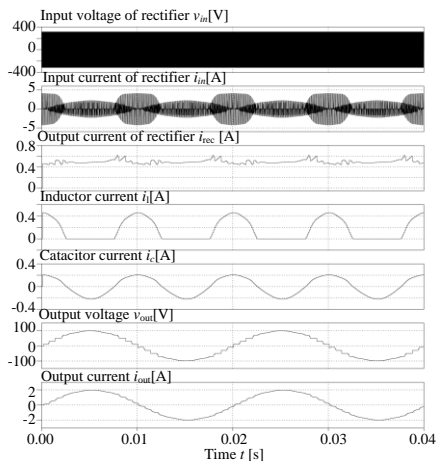


図10 単相電力脈動補償機能を有するインダイレクトマトリックスコンバータの動作波形(シミュレーション)

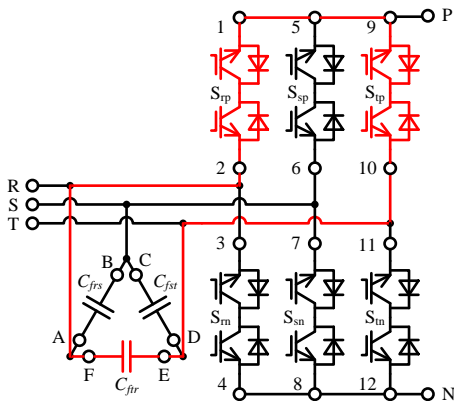


図11 三相-単相マトリックスコンバータ

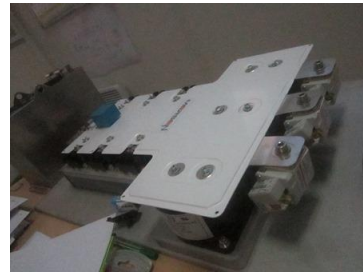


図12 製作した三相-単相マトリックスコンバータのラミネートブスバー外観図

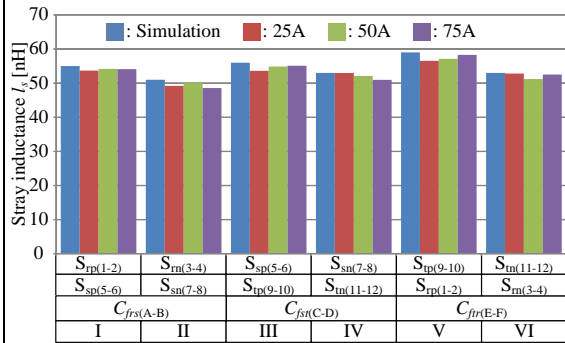
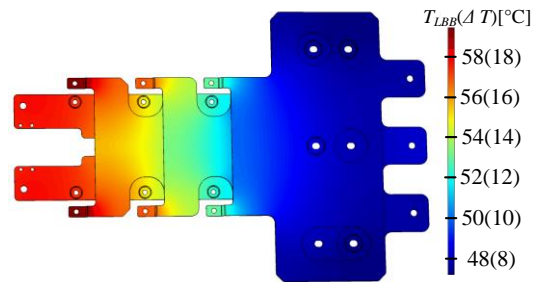
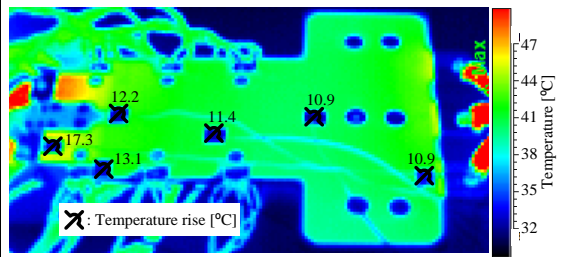


図13 電流経路毎の寄生インダクタンス(シミュレーション結果と実測結果の比較)



(a) シミュレーション結果



(b) 実測結果

図14 ブスバーの温度測定結果

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4件)

① J. Itoh, T. Aaraki, K. Orikawa, Experimental Verification of EMC Filter Used for PWM Inverter with Wide Band-Gap Devices, IEEJ

Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 3, pp. 212-219 (2015), 査読有り (10.1541/ieejia.4.212)

②中田祐樹, 伊東淳一, 百 kHz 級単相-商用周波三相マトリックスコンバータの PDM 制御法, 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No. 1, pp. 41-48 (2013), 査読有り (10.1541/ieejias.134.41)

③K. Kusaka, J. Itoh, Reduction of Reflected Power Loss in an AC-DC Converter for Wireless Power Transfer Systems, IEE of Japan Journal of Industry Applications, Vol. 2, No. 4, pp. 195-203 (2013), 査読有り (10.1541/ieejia.2.195)

④日下佳祐, 伊東淳一, 磁界共振結合による非接触給電の駆動用電源及び受電側整流器に関する一考察, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 8, pp. 849-857 (2012), 査読有り (10.1541/ieejias.132.849)

〔学会発表〕(計 16 件)

①日下佳祐, 伊東淳一, 非接触給電における低次高調波に起因する放射磁界の一低減手法 -マルチレベルインバータの適用-, 平成 27 年電気学会全国大会, 2015 年 3 月 26 日, 東京都杉並区

②Y. Kadoshima, K. Koiwa, J. Itoh, F. Anne, A. Gerlaud, Surge Voltage Suppression Methods for Three-phase to Single-phase Matrix Converter, The Applied Power Electronics Conference and Exposition 2015, 2015 年 3 月 17 日, Charlotte (U.S.)

③提橋郁人, 日下佳祐, 折川幸司, 伊東淳一, 電流形ゲート駆動回路を用いた高周波電力変換回路の実機検証, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, 2015 年 1 月 23 日, 大阪府旭区

④A. Sagehashi, K. Kusaka, K. Orikawa, J. Itoh, A. Momma, Pattern Design Criteria of Main Circuit Using Printed Circuit Boards for Parasitic Inductance Reduction, 16th Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2014, 2014 年 9 月 21 日, Antalya(Turkey)

⑤提橋郁人, 日下佳祐, 折川幸司, 伊東淳一, 高周波インバータ向け電流形ゲート駆動回路に関する基礎検討, 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2014 年 9 月 3 日, 島根県松江市

⑥門嶋祥之, 小岩一広, 伊東淳一, François Anne, 佐々木淳也, 大容量三相単相マトリックスコンバータのサージ電圧抑制の一手法, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, 2014 年 8 月 26 日, 東京都足立区

⑦J. Itoh, T. Araki, K. Orikawa, Experimental Verification of an EMC Filter Used for PWM Inverter with Wide Band-Gap Devices, The 2014 International Power Electronics Conference, 2014 年 5 月 28 日, 広島県広島市

⑧K. Koiwa, G.T.Chiang, J. Itoh, Loss Analysis and Design Method for High Efficiency Matrix Converter, The 2014 International Power

Electronics Conference, 2014 年 5 月 28 日, 広島県広島市

⑨Y. Nakata, J. Itoh, A Fundamental Verification of a Single-phase to Three-phase Matrix Converter with a PDM Control based on Space Vector Modulation, The 2014 International Power Electronics Conference, 2014 年 5 月 28 日, 広島県広島市

⑩荒木隆宏, 折川幸司, 伊東淳一, GaN-FET を用いた高周波スイッチング PWM インバータシステムの総合効率評価, 平成 26 年電気学会全国大会, 2013 年 3 月 18 日, 愛媛県松山市

⑪N. Phokhaphan, K. Choiesai, K. Noguchi, T. Araki, K. Kusaka, Jun-ichi Itoh, Wireless Power Transfer Based on MHz Inverter through PCB Antenna, IFEEC2013, 2013 年 11 月 3 日, Tainan (Taiwan)

⑫中田祐樹, 伊東淳一, 空間ベクトル変調を基にした PDM 制御の高周波単相-低周波三相マトリックスコンバータへの適用, 平成 25 年電気関係学会関西連合大会, 2013 年 11 月 16 日, 大阪府寝屋川市

⑬提橋郁人, 日下佳祐, 折川幸司, 伊東淳一, 門馬彰夫, プリント基板上の DC バス構造による寄生インダクタンスの差異の考察, 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, 2013 年 10 月 21 日, 大阪府吹田市

⑭荒木隆宏, 折川幸司, 伊東淳一, GaN-FET のを用いた PWM インバータの EMC フィルタに関する実験検討, 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, 2013 年 10 月 21 日, 大阪府吹田市

⑮提橋郁人, 日下佳祐, 折川幸司, 伊東淳一, 配線パターン設計に起因するインダクタンス特性に関する一考察, 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2013 年 9 月 21 日, 石川県金沢市

⑯中田祐樹, 伊東淳一, 百 kHz 級単相-商用周波三相マトリックスコンバータの PDM 制御法, 電気学会半導体電力変換研究会, 2012 年 1 月 25 日, 京都府京田辺市

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊東 淳一 (ITO, Junichi)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 90377218