

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01424

研究課題名(和文)マトリックスコンバータを用いた小型・高効率ワイヤレス電力伝送回路

研究課題名(英文) Small-Size and High - Efficiency Wireless Power Transfer Circuit Using 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) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：地球環境保全に向けて電気自動車等の普及が進められている。電力系統と電気自動車の蓄電池をワイヤレス電力伝送で充放電する技術開発が行われている。ワイヤレス電力伝送により、信号での停止中や走行中にも充電が可能になり、自動車のバッテリーも小型化でき、多くのメリットがある。ワイヤレス電力伝送回路への要求として、小型・高効率と双方向電力変換がある。本研究では、三相電源を直接、高周波変換するマトリックスコンバータを用いた小型・高効率双方向ワイヤレス電力伝送システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、マトリックスコンバータを用いることで、ワイヤレス電力伝送システムの小型化と高効率化を実現した。学術的には、低損失化を図るためのソフトスイッチング技術と、電源のノイズ低減と高効率化のための三相電源における力率1の正弦波電流波形を実現し、マトリックスコンバータの低ノイズ・高効率技術を確立した。社会的には、小型・高効率双方向ワイヤレス電力伝送システムの実現に向けた基礎技術に貢献した。

研究成果の概要(英文)：Electric vehicles are increasing for protecting the global environment. Technological development is underway to charge and discharge between the power system and storage batteries of electric vehicles by wireless power transmission. Wireless power transfer makes it possible to charge the battery even while stopping at a signal or running, and the battery capacity of the electric vehicle can be reduced, which has many advantages. The requirements for wireless power transmission circuits are small size, high efficiency, and bidirectional power conversion. In this research, we have developed a compact and highly efficient bidirectional wireless power transmission system that uses a matrix converter that directly converts a three-phase power supply to high frequencies.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス ワイヤレス電力伝送 ソフトスイッチング マトリックスコンバータ 高効率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全に向けて電気自動車等の普及が進められる中で、現状のプラグを用いた充電から、将来技術としてワイヤレス電力伝送の開発が進められ、ワイヤレス電力伝送の新たな学術分野が構築されつつある。ワイヤレス伝送技術により、信号での停止中や走行中にも充電が可能になれば、自動車に搭載するバッテリーも小型化できるなどの多くのメリットがあり、ワイヤレス電力伝送は、今後、発展する学術分野である。ワイヤレス電力伝送回路への要求として、小型・高効率と双方向電力変換がある。双方向電力変換は、バッテリーのエネルギーを電力システムに送り返す機能である。双方向電力変換は、天候によって太陽光発電や風力発電の電力急変による電力システム不安定化を、バッテリーのエネルギーを用いて安定化させたり、災害時の電力停止時にバッテリーのエネルギーを用いて、家庭などに一時的に電力供給したりするために必要な技術で、このように電力システム制御への波及効果も期待される。

ワイヤレス電力伝送は、2006年にMIT (Massachusetts Institute of Technology) の研究者 Marin Soljacic 氏が磁界共鳴方式ワイヤレス給電の論文を発表し、2007年に実験検証が行われたことをきっかけに、世界的にワイヤレス電力伝送の研究開発が進められている。パワーエレクトロニクス関連の最も権威ある国際会議 ECCE 2017 (9th Annual IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, 2017年10月1日~5日、米国シンシナティ開催)では、ワイヤレス電力伝送について、8セッション、43論文が発表され、世界的に重要な研究課題になっている。国内においても重要な研究課題として取り上げられ、電気学会では、ワイヤレス電力伝送に関して「ワイヤレス電力伝送システムにおけるパワーエレクトロニクス技術調査専門委員会」が2017年2月~2019年1月までの2年間設置され、研究動向が調査されている。

2. 研究の目的

図1(a)は、従来のワイヤレス電力伝送回路構成で、商用三相交流電源からバッテリーへ片方向の電力変換回路である。送電側は、三相交流電源をPWM整流回路にて直流 V_o にし、直流からHブリッジ回路にて高周波交流 v_1 に電力変換してワイヤレス電力伝送をする。送電側は、PWM整流回路とHブリッジ回路による2個の電力変換回路から構成され、直流部にコンデンサ C_o も必要である。受電側は、ダイオード整流回路とリアクトル L_o により高周波交流 v_2 を整流して、直流電圧 V_{dc} を得ている。ワイヤレス電力伝送回路への要求として、小型・高効率と双方向電力変換がある。小型・高効率は全ての電力変換器に共通した課題である。双方向電力変換は、バッテリーのエネルギーを電力システムに送り返す機能である。双方向電力変換は、天候によって太陽光発電や風力発電の電力急変による電力システム不安定化を、バッテリーのエネルギーを用いて安定化させたり、災害時の電力停止時にバッテリーのエネルギーを用いて、家庭などに一時的に電力供給したりするために必要な技術で、このように電力システム制御への波及効果も期待される。

図1(b)は、提案するワイヤレス電力伝送回路構成で、小型・高効率双方向電力変換の回路構成である。送電側に双方向電力変換器であるマトリックスコンバータを用いて、三相交流電源から高周波交流 v_1 への直接変換により、1個の電力変換回路で構成でき、直流部がないのでコ

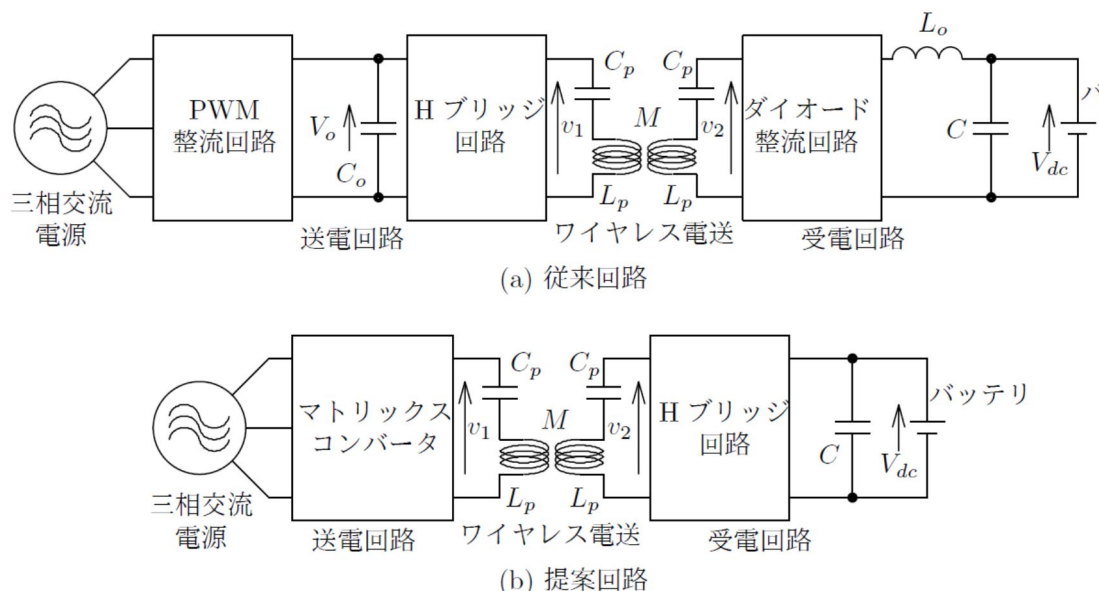


図1 ワイヤレス伝送回路構成

ンデンサも不要になり，従回路に比較して送電側の回路体積を約 1 / 2 にできる。また，電力変換回数も 1 回なので，送電側の電力損失を低減でき，高効率を実現できる。受電側を，双方向電力変換器にするため，Hブリッジ回路のみとし，平滑リアクトルは不要である。提案回路はこのように小型・高効率と双方向電力変換ができ，将来的に三相交流電源とバッテリーとを接続するワイヤレス電力伝送回路の標準回路になる可能性を持っている。提案回路の優位性を高めるために，さらなる低損失化および，電源力率制御を含めたワイヤレス電力伝送の制御法とその安定化を検討する。

本研究の目的は，図 1 (b) の小型・高効率と双方向電力変換の提案するワイヤレス電力伝送回路において，さらなる低損失を図ると共に，制御法の確立を目指す。具体的には，次の 3 項目を実施する。

- (1) スイッチング損失低減のための全てのスイッチのソフトスイッチング技法の確立
- (2) マトリックスコンバータによる正弦波入力電流と電源総合力率 1 制御の確立
- (3) ワイヤレス部の位置ずれなどによるパラメータ変化に対する安定した制御法の確立

提案する三相交流と直流との電力変換をするワイヤレス電力伝送回路は，これら 3 項目の理論が確立すれば，小型・高効率を実現できるので，三相交流と直流を接続するワイヤレス電力伝送回路の基本回路として定着する可能性も高い。三相交流と直流との双方向ワイヤレス電力伝送回路における新たな学術分野を構築できる。

3. 研究の方法

研究目的に示した 3 項目の実施内容について具体的内容を以下に示す。図 2 に提案回路の具体的なワイヤレス伝送回路構成を示す

- (1) スイッチング損失低減のための全てのスイッチのソフトスイッチング技法の確立

絶縁型 AC/DC コンバータにおけるソフトスイッチング技法をワイヤレス電力伝送への適応理論を導出する。提案するワイヤレス電力伝送回路は，絶縁型 AC/DC コンバータとは異なり，位相補償用キャパシタンス C_p と伝送コイルのインダクタンス L_p との共振回路となるが，共振電流位相制御により，全てのスイッチのソフトスイッチング技法を導出できる。ソフトスイッチングの動作範囲を決めるために，各スイッチの並列キャパシタ容量 C_{soft1} , C_{soft2} を設計する。実験によりソフトスイッチングによる損失低減効果を明らかにする。

- (2) マトリックスコンバータによる正弦波入力電流と電源総合力率 1 制御の確立

提案回路において三相交流電源の電流波形にひずみが発生している。これは，高周波電流波形を方形波近似して，入力電流波形を制御しているためである。電源電流ひずみを改善のために，申請者が既に提案している絶縁型 AC/DC コンバータでの台形波近似による改善法の考え方を適用して，ワイヤレス電力伝送では，高周波電流波形を正弦波入力電流に近似した入力電流制御理論を導出する。実験により，電源電流の波形ひずみの改善効果を明確にする。

- (3) ワイヤレス部の位置ずれなどによるパラメータ変化に対する安定した制御法の確立

送信コイルと受信コイルの距離や位置ずれにより，コイルの自己インダクタンス L_p および相互インダクタンス M が変化する。インダクタンス等が変化しても送電電力をできるだけ大電力に保つように，巻線構造と高周波周波数の調整法を導出する。実験により，送受信コイルの位置関係に対する送電電力の関係を明らかにする。

4. 研究成果

研究目的および研究方法に示した 3 項目の実施項目について具体的研究成果を以下に示す。

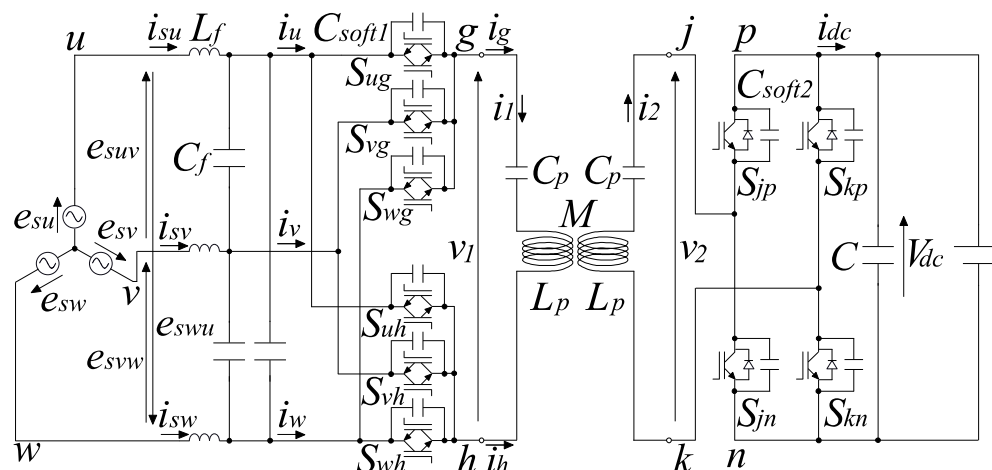


図 2 提案回路の具体的なワイヤレス伝送回路

(1) スwitching損失低減のための全てのスイッチのソフトスイッチング技法の確立

図3は、ワイヤレス伝送部の等価回路である。図4は一次側と二次側の各スイッチのオン信号と電圧、電流波形である。図4の電力伝送部の高周波の一周期間の電圧、電流波形は、ソフトスイッチング状態の電圧、電流の理論波形である。ソフトスイッチング条件は、一次、二次の電圧と電流の位相関係で判断できる。送電側の一次側においては、一次電圧 v_1 がより高い電圧に変化するときに一次電流 i_1 の符号が負であり、一次電圧 v_1 がより低い電圧に変化するときに一次電流 i_1 の符号が正である。ソフトスイッチング条件を満たすように、一次側では、一次電圧 v_1 が最初に立ち上がる位相と電流位相 1 との間に、 $1 >$ の関係が成立するように制御する。受電側の二次側では、電流符号が逆になった状態がソフトスイッチング条件になる。二次電圧 v_2 がより高い電圧に変化するときに二次電流 i_2 の符号が正であり、二次電圧 v_2 がより低い電圧に変化するときに二次電流 i_2 の符号が負である。ソフトスイッチング条件を満たすように、二次側については、二次電圧 v_2 が零に立ち上がる位相 $2+d_2$ と電流位相 2 の間に、 $2 > 2+d_2$ の関係が成立するように制御する。

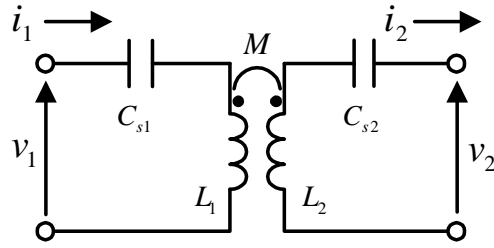


図3 ワイヤレス伝送部の等価回路

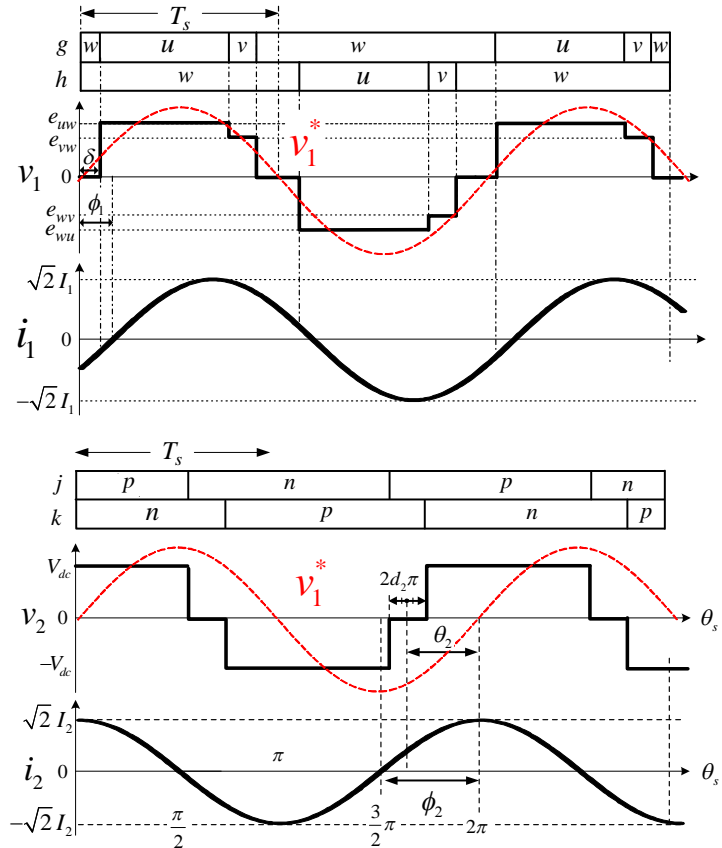


図4 ワイヤレス伝送部のスイッチング信号と各波形

試作システムとして三相交流電圧 $E=200V$ を用い、出力電圧 $V_{dc}=200V$ としている。高周波電力伝送部の周波数 f_s は標準的な周波数の $85kHz$ にして、出力電力を $2kW$ として設計している。

試作システムによるソフトスイッチングの実験結果を説明する。図5は、高周波ワイヤレス伝送部の一次電圧 v_1 、一次電流 i_1 、二次電圧 v_2 、二次電流 i_2 の実験波形である。いずれの波形もソフトスイッチングが実現されている。送電側の一次側においては、一次電圧 v_1 がより高い電圧に変化するときに一次電流 i_1 の符号が負であり、一次電圧 v_1 がより低い電圧に変化するときに一次電流 i_1 の符号が正になっており、一次側ソフトスイッチング条件が成立している。受電側の二次側では、二次電圧 v_2 がより高い電圧に変化するときに二次電流 i_2 の符号が正であり、二次電圧 v_2 がより低い電圧に変化するときに二次電流 i_2 の符号が負となっており、二次側ソフトスイッチング条件が成立している。

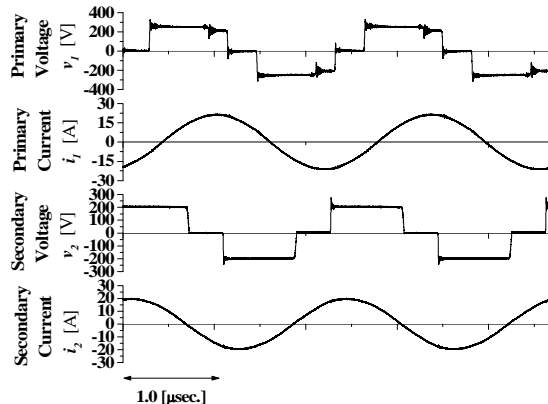


図5 出力電圧 $V_{dc}=200V$ の高周波波形

(2) マトリックスコンバータによる正弦波入力電流と電源総合力率1制御の確立

図4のマトリックスコンバータのg相,h相のスイッチuのオン時に一次電流*i*₁が電源のu相電流*i*_uとして流れる。したがって,u,v,w相スイッチのオン時間割合により,電源の各相瞬時電流を制御できる。毎制御周期ごとに,総合力率1の正弦波の電源電流指令値を与え,指令通りの電流を実現するように,各相スイッチのオン時間割合をコントローラ内で計算すれば,電源電流を正弦波の総合力率1に制御できる。

図6は,出力電力2kWで,出力直流電圧V_{dc}=200Vとしたときの電源線間電圧*e*_{su},電源電流*i*_{su},一次電圧*v*₁,一次電流*i*₁,二次電圧*v*₂,二次電流*i*₂,出力直流電圧V_{dc},出力直流電流I_{dc}の実験波形である。電源線間電圧*e*_{su}に対して電源電流*i*_{su}は30度遅れた正弦波波形に制御され,電源総合力率1の制御を実現している。出力直流電圧V_{dc},出力直流電流I_{dc}も一定値の安定した直流波形が得られている。ワイヤレス伝送の高周波波形一次電圧*v*₁,一次電流*i*₁,二次電圧*v*₂,二次電流*i*₂については,一定交流電圧,電流であり,既に示した図5がこの拡大波形で,ソフトスイッチングを実現している。

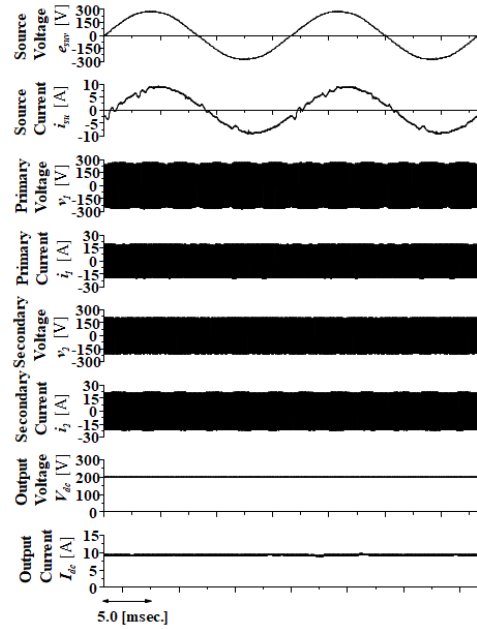


図6 出力電圧V_{dc}=200Vの入出力波形

(3) ワイヤレス部の位置ずれなどによるパラメータ変化に対する安定した制御法の確立

ワイヤレス電力伝送においては,一次および二次コイル間の横方向のずれやコイル間距離の違いにより,回路パラメータが変化する。回路パラメータが設定値と異なっても低損失化のためのソフトスイッチングを成立させ,一定電力を送るための方法として,電力伝送コイルの一次電圧実効値V₁と周波数*f*_sを調整する方法を提案している。図4の高周波電力伝送部波形において,一次側ソフトスイッチング条件は,一次電圧*v*₁が最初に立ち上がる位相 時点の一次電流が負となるようになるように一次電流の遅れ位相 1 がより大きくなる(1)式である。二次側ソフトスイッチング条件は,二次電圧V₂が立ち上がる時点で二次電流*i*₂が正となるように二次電流の進み位相 2 が正になる(2)式である。出力電力P_{out}が一定値(constant)となるように(3)式の関係が得られる。

$$\phi_1 > \delta \quad (1)$$

$$\phi_2 > \theta_2 + \pi d_2 \quad (2)$$

$$P_{out} = \text{constant} \quad (3)$$

図7はパラメータ変化時のソフトスイッチングが成立する(1),(2)式の範囲を示すと共に,P_{out}=2kWとしたときの(3)式の動作曲線を示している。(3)式の動作曲線上で(1),(2)式を満足する範囲において,定格周波数85kHzに比較的近い動作点として一次電圧実効値V₁=210V,*f*_s=84kHzを選定している。図8は,図7の動作点におけるワイヤレス伝送の高周波波形一次電圧*v*₁,一次電流*i*₁,二次電圧*v*₂,二次電流*i*₂で理論通りにソフトスイッチング条件を満足した波形が得られている。

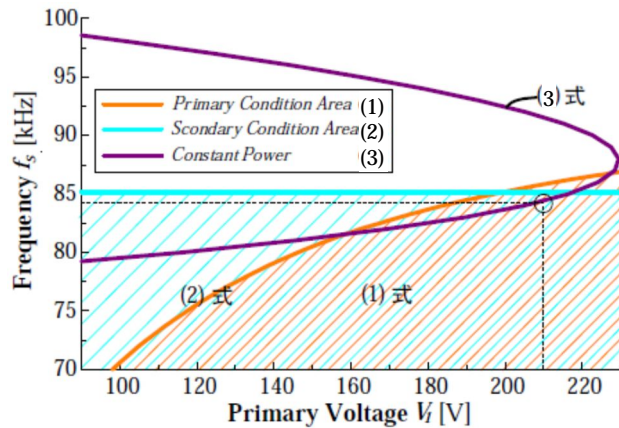


図7 パラメータ変化時のソフトスイッチング条件

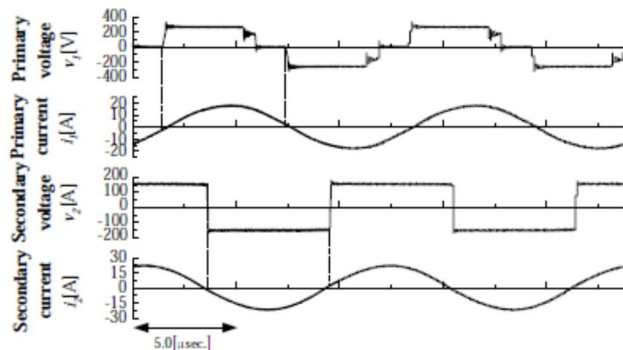


図8 パラメータ変化時の高周波波形

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 Motoyama Hiromasa, Hayashi Yuji, Takeshita Takaharu	4. 巻 1
2. 論文標題 Simple Control Method of Wireless Power Transfer System Using Matrix Converter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	6. 最初と最後の頁 2464-2471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ECCE.2018.8557643	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 Hayashi Yuji, Motoyama Hiromasa, Takeshita Takaharu	4. 巻 140
2. 論文標題 Bidirectional Power Flow Control in Wireless Power Supply System Using Matrix Converter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 704-715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.704	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗山圭太, 竹下隆晴
2. 発表標題 マトリックスコンバータを用いた非接触給電システムにおける一次電流正弦波近似によるデューティ比導出
3. 学会等名 2019年電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木田浩也, 林 裕二, 竹下隆晴
2. 発表標題 ソフトスイッチング非接触給電システムの高周波電流位相制御
3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木田浩也, 本山景勝, 竹下隆晴
2. 発表標題 マトリックスコンバータを用いた非接触給電システムのソフトスイッチング制御
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木田浩也, 竹下隆晴
2. 発表標題 マトリックスコンバータを用いた非接触給電システムのソフトスイッチング技法と出力電力制御
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本力, 荒木田浩也, 竹下隆晴
2. 発表標題 マトリックスコンバータを用いた非接触給電システムの周波数によるソフトスイッチング制御
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------