

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656182

研究課題名(和文) 直流電気出力までを含めた1mのワイヤレス電力伝送システム

研究課題名(英文) wireless power transmission from ac to dc at 1 m distance

研究代表者

河村 篤男 (KAWAMURA, Atsuo)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：80186139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：1. 13.56MHzでの整流器部分の効率を向上させるために交流側にキャパシタを挿入し、また、整流器前にインピーダンスマッチャーを挿入して実験を行った。その結果、1kwの出力で整流器効率94%が実測された。アンテナのコイルの抵抗分を下げることで、等価回路での励磁インダクタンスを最適化することなどの方針を等価回路より導き、アンテナコイルの線材を変更してアンテナを改造した。その結果、アンテナの変換効率96%が実測された。

2. 上記の2点の改良により、交流電圧源から直流出力までの変換効率は、 $0.94 \times 0.96 = 0.9$ 程度は予想されるが、実験では、1.5kw出力で12cmの距離で89.1%を実測した。

研究成果の概要(英文)：1. To improve the efficiency of the rectifier at 13.56MHz, a capacitor was inserted in the ac side, and also an impedance matcher was inserted in front of the rectifier. As a result the efficiency 94% was experimentally observed at 1 kW output power. To improve the efficiency of the antenna, the wire resistance was reduced by changing the wire material and the magnetizing inductance was optimized by using the proposed equivalent circuit. As a result the 96% efficiency of the antenna was observed. 2. By implementation of the above two improvement, the total efficiency from 13.56MHz ac input to the dc output is expected to be $0.94 \times 0.96 = 0.90$, however the experiments at 1.5 kW output power of 12 cm distance showed the 89.1% efficiency. The detail was presented at IPEC-Hiroshima held in May, 2014.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

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 共振型整流回路

1. 研究開始当初の背景

Massachusetts Institute of Technology の Marin Soljacic 助教授らが提案した電気磁気共鳴を使う方法(A. Karalis *et. al.*, “Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer,” *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34-48, Jan. 2008.) では、インダクタンスの L 成分と浮遊 C 成分の数十 MHz の共振により、2 m 程度の距離のもと、高効率 (40 %程度) で 60 W 程度の電力を送送できると書かれている。申請者は、(H20-22 挑戦的萌芽)において、この追実験を行い、さらに、改良を重ねた結果、20 cm の距離においても 99 %程度の効率で高周波の電力 (交流-交流) が送れることは確認できた。(倉田、河村、“磁気結合等価回路を利用した非接触給電の高効率化に関する研究,” 電気学会研究会 IIC-10-15, 2010 年 3 月)。しかしながら、最終的には直流の電気エネルギーを取り出す必要があり、トータルとしてのエネルギー伝送効率が重要な課題となっていた。

2. 研究の目的

電気磁気結合の原理に基づくワイヤレス電力伝送の研究 (H20-22 挑戦的萌芽) の結果、20 cm の距離においても 99 %程度の効率で高周波の電力が送れることが確認できた。(倉田、河村、“磁気結合等価回路を利用した非接触給電の高効率化に関する研究,” 電気学会研究会 IIC-10-15, 2010 年 3 月)。しかし、このデータは高周波数 (約 13 MHz) での送電端と受電端の電力の測定比のため、送られた電力を電気機器のエネルギー源として使うには、高周波電力を直流に変換する必要がある。高い周波数での電力用整流器は効率が非常に低い。そこで、本研究では、高周波の電力の送電端からワイヤレス受電して、さらに直流変換までを含めた総合効率を向上するための全体システム設計の基礎研究を行う。

3. 研究の方法

申請者がこれまで提案してきた電気磁気共鳴器の等価回路を設計ツールとして、高周波共振整流器の設計、電気磁気共鳴器との接続に注意して、交流から直流までの全体効率を最適化する基本手法を解明する。計画の手順の要点を抜き出すと以下となる。

<H24 年度>

理論構築と実証実験

- ① 理論構築と整流器のトポロジー
- ② 共振型高周波整流回路の製作
- ③ 電力伝送の理論と実験の比較検討
- ④ 最適化手順の見直し
- ⑤ 人的配置

<H25 年度>

直流電力までの伝送効率最大化の方法論の提案と実証実験

- ① 前年度の伝送効率の実験データの検討
- ② 実験装置の再検討
- ③ 伝送効率の最大化実験と設計手順の提案
- ④ 人的配置

4. 研究成果

平成 20 年度から平成 22 年度までの電気磁気結合の原理に基づくワイヤレス電力伝送の研究の結果、20 cm の距離においても 99 %程度の効率で高周波の電力が送れることが確認できた。しかし、このデータは高周波数 (約 13 MHz) での送電端と受電端の電力の測定比のため、送られた電力を電気機器のエネルギー源として使うには、高周波電力を直流に変換する必要がある。しかしながら、一般に高い周波数での電力用整流器は効率が非常に低い。そこで、本研究では、高周波の電力の送電端からワイヤレス受電して、さらに直流変換までを含めた総合効率を向上するための全体システム設計の基礎研究を行う。

【H24 年度分】

平成 24 年度においては、理論構築と実証実験を行い、下記 4 点の研究を実施した。

(1) 理論構築と共振型整流器のトポロジーとして、これまでの等価回路を用いたアプローチをベースにし、中継器および共振型整流器を含めた等価回路を提案した。また提案した回路の動作について、P-SPICE (Personal computer Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) を用いたシミュレーションを実施し、共振型整流器のトポロジーによる整流効率の変化に関する詳細な解析を完了した。

(2) 高周波共振整流回路の製作として、これまでに開発に成功してきた電気磁気共鳴部発展させるとともに、新たに共振型整流回路部分を製作することに成功した。

(3) 電力伝送の理論と実験の比較検討として、電気磁気共鳴を用いない条件下における共振整流器の動作を確認したのち、電気磁気共鳴を用いてワイヤレス電力伝送を実施した。また、電力伝送を行った際に測定した伝送効率を基に、理論の検討を行いその妥当性を確認した。

(4) 最適化手順の見直しとして、研究計画 (1) で着手した「理論構築と共振型整流器のトポロジー」に関し、効率を最大化する手

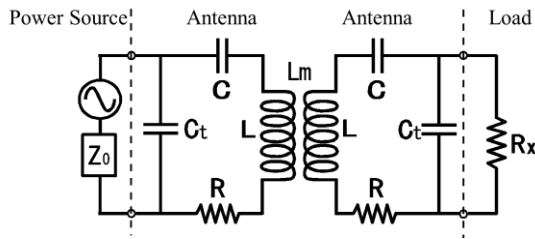


図 1. ヘリカルアンテナの等価回路

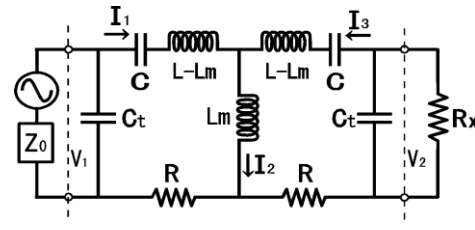


図 2. 図 1 の T 型等価回路

順について検討を行った。

【H25 年度分】

平成25年度においては、直流電力までの伝送効率最大化の方法論の提案と実証実験に取り組み、下記3点の研究を実施した。

(1) 前年度の整流効率の見直し

13.56 MHzの周波数において、整流器部分の効率が高くない点に関して検討を行った。P-SPICEを用いてシミュレーションを実施した結果、SiCダイオードにおける回復電流の影響が大きいことが明らかとなった。そこで、この効果を抑制するため、交流側にキャパシタを挿入するとともに、整流器前にインピーダンスマッチャーを挿入した。その結果、交流側が電流源になり電流連続モードでの動作が可能になった。これにより、整流器の変換効率が向上し、負荷に依存はするものの、1 kw出力下における94%の効率が実測された。

(2) アンテナ部の再検討

アンテナ効率の向上にむけて対策を検討した。アンテナ部においては、実データと一致する理論式がすでに得られていたことから、理論式を解析することで、コイルの抵抗値を下げることや、等価回路での励磁インダクタンスを最適化することなどの改善策が得られた。これら理論式から導かれた改善策に従い、アンテナで使用されるコイル線材の変更を行った。結果、幅広い帯域においてアンテナ部の変換効率を向上させることに成功し、96%の高い効率が実測された。

(3) 伝送効率の最大化実験

上述の改善により、整流器の変換効率を94%に向上させるとともに、アンテナ部の変換効率を96%に向上させることに成功した。したがって、交流電圧源から直流出力までの総合的な変換効率は90% ($0.94 \times 0.96 = 0.90$) 程度となることが予想された。研究計画(3)では、これを実証するため、整流器とアンテナ部を統合した総合実験を実施した。

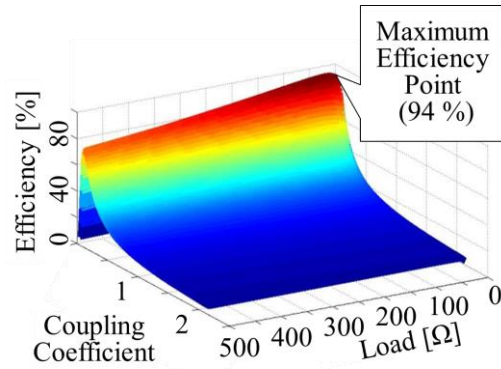


図 3. 非接触給電における電力伝送効率

実験の実施においてはまず、解析に用いるアンテナモデルの構築に着手した。図1に本研究で用いた開口型ヘリカルアンテナの等価回路を示す。ここで R 、 L 、 C 、 C_t はそれぞれ抵抗、アンテナの自己インダクタンス、直列容量成分、並列容量成分を表す。また、 Z_0 、 R_x は電源の内部インピーダンスおよび負荷抵抗である。ヘリカルアンテナとはダイポールアンテナにおける2本の直線状の導線をループ状に巻きつけることによって、磁界を集中させ、導線間容量によりLC共振を起こすアンテナである。図2に相互インダクタンス L_m を用いた図1のT型等価回路を示す。

続いて、本回路網の周波数特性を測定するためネットワークアナライザによる解析を実施した。ネットワークアナライザによる解析結果と図2に示されるT型回路より、各パラメータの値が導かれ、伝送効率を算出することが可能となる。本研究では伝送効率の解析においてSパラメータを用いた。Sパラメータを導入することで、アンテナにおける電力の反射特性および伝送特性を評価することが可能となる。

効率を最大化するためには反射特性を零にする必要があり、これにより伝送効率は、主に負荷抵抗、および、送信距離の関数である結合係数により求められることとなる。図3に伝送効率の解析結果を示す。本解析結果より、本実験装置では50Ωの負荷抵抗と、0.1の結合係数という条件下において最大効率が得られることを確認した。

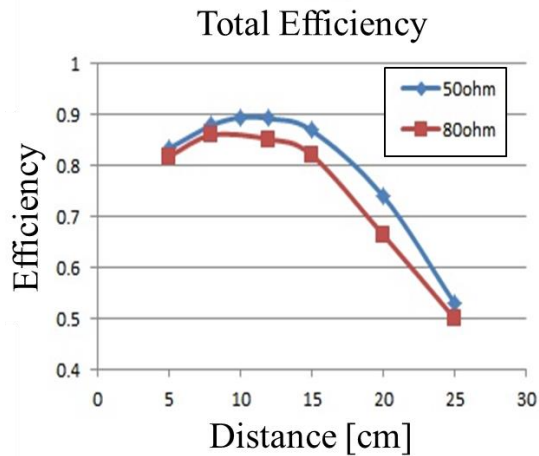


図 4. 伝送距離と効率との関係

上記解析結果を基に実証実験を行った。実験においてはアンテナと整流器からなる装置を用いた総合的な電力伝送効率を測定した。また、実験では $50\ \Omega$ および $80\ \Omega$ の 2 種類の負荷抵抗を用い、入力電力は $1.5\ \text{kw}$ とした。図 4 に実験結果を示す。横軸は伝送距離であり、縦軸は伝送効率である。実験の結果 $12\ \text{cm}$ の伝送距離と $50\ \Omega$ の負荷抵抗下において、 89.1% の電力伝送効率を実現することに成功した。

以上、本研究課題においては、直流電気出力までを含めたワイヤレス電力伝送システムの体系的設計論を確立し、 89.1% の電力伝送効率を実現することに成功した。

詳しい研究成果については、2014 年 5 月に開催された International Power Electronics Conference-Horoshima 2014 において発信を行った（学会発表論文②）。

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 0 件）

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① Mohammad Bani Shamseh, Atsuo Kawamura, Itsuo Yuzurihara, and Atsushi Takayanagi: “A wireless power transfer optimization for high efficiency and high power application,” International Power Electronics Conference-Horoshima, IEEE, 2014.
- ② Mohammad Bani Shamseh, Atsuo Kawamura, and Itsuo Yuzurihara: “Distortion reduction in current and voltage waves for a high efficiency and high frequency rectifier for WPT

applications,” Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2013.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織
(1)研究代表者
河村 篤男(KAWAMURA ATSUO)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号：80186139