

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04042

研究課題名(和文) narrow beam型ワイヤレス給電用大電力受電整流回路の研究開発

研究課題名(英文) Research on High Power Rectifier for Narrow Beam Wireless Power Transfer

研究代表者

篠原 真毅 (Shinohara, Naoki)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：10283657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では空間伝送型ワイヤレス給電のうち、narrow beam型ワイヤレス給電のための大電力受電整流回路の開発を主目的とした。1) 既存ショットキーバリアダイオードを用いた受電整流回路を、弱電用整流回路で用いられる手法論である回路インピーダンスの最適化等による高効率化、2) HEMT等3端子半導体を用いた大電力整流回路の開発、を行い、最終的にR級負荷型シングルシャント整流回路を開発して入力電力4.22Wの時に効率74.0%、出力電圧14.8Vを実現した。さらに16素子アレーレクテナによって、43.6W、5.7GHz入力から61.9%の変換効率で直流を発生することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年ワイヤレス給電の実用化は結合型からwide beam型空間伝送型へと移り、さらに近い両頼narrow beam型空間伝送型へと移っていくと予想されている。そのために求められる大電力受電整流回路として世界初となるR級負荷型シングルシャント整流回路を開発し、4Wを超える大電力かつ74%の高効率を実現した本研究は学術的意義が高く、同時に今後のワイヤレス給電のさらなる実用化に高い意義を持つものである。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to develop a high-power rectifier circuit for narrow beam wireless power transfer (WPT). 1) Improving the efficiency of power rectifier circuits using conventional Schottky barrier diodes by optimizing circuit impedance, which is a methodology used in low-power rectifier circuits, and 2) High-power rectification using three-terminal semiconductors such as HEMTs, were carried out in this research. Finally a developed class R load type single shunt rectifier circuit achieved an efficiency of 74.0% and an output voltage of 14.8V at an input power of 4.22W. Furthermore, We succeeded in generating DC from a 43.6W, 5.7GHz input with a conversion efficiency of 61.9% by using a 16-element array rectenna.

研究分野：マイクロ波応用工学

キーワード：ワイヤレス給電 マイクロ波送電 レクテナ 整流回路

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

ワイヤレス給電が注目され始めて10年がたち、近年は国内外で商品化や法制化が進んできた。この10年は電磁誘導型もしくは結合型と呼ばれる100kHz程度以下の高周波磁場を介した近距離のワイヤレス給電の発展が著しい。Appleも参加する数W程度の「置くだけワイヤレス充電器」が世界のデファクトとして商品化され、数kW以上の電気自動車のワイヤレス充電がITU(International Telecommunication Union)において議論され、recommendationが行われた。ここ数年はワイヤレス給電の距離をさらに伸ばすことのできる空間伝送型もしくは非結合型と呼ばれるマイクロ波を介したワイヤレス給電が注目され、我が国においては2020年7月14日に情報通信審議会へ諮問が行われ、920MHz帯、2.4GHz帯、及び5.7GHz帯の空間伝送型ワイヤレス給電の制度整備が2020年(度)中に行われる。国際的にもITUでの結合型ワイヤレス給電の議論と並行し、2016年には空間伝送型ワイヤレス給電のreportが発行され、現在recommendation発行に向け議論中である。結合型ワイヤレス給電は近距離であるがゆえに効率が大きく、kHzオーダーの高周波回路であるためにコストも安いという特徴があるが、充電デバイスを送電器に置く、もしくは極力近づけるといったワンアクションが必要で、ワイヤレスという実感が乏しい。空間伝送型は電波を介しているため、WiFi等と同じく「知らないうちに」充電することが可能であり、次のワイヤレス給電として注目されている。

米国IEEEでは2011年に申請者が立ち上げた国際会議IEEE WPP(Wireless Power Week)が中心となり研究活動が行われているが、この国際学会活動はIEEEのマイクロ波ソサイエティが中心となり、空間伝送型を核としてきた。国内では電子情報通信学会通信ソサイエティ内に研究会が発足し活動しているが、空間伝送型が中心であることに変わりはない。空間伝送型ワイヤレス給電技術は、主に電波に関するアンテナ/伝搬技術と電波の発生/変換に関する回路/半導体秘術に大別される。一般の通信技術やリモートセンシング技術と基礎理論は同じであるが、すべて「効率」に主眼を置き研究開発をする必要があり、これまでとは異なった視点での研究開発が必要とされる。また、応用システムやユーザー要求によって求められる技術が異なり、システム要求に対する最適な技術の選択と課題抽出、研究テーマの設定が求められる。

2. 研究の目的

本研究では空間伝送型ワイヤレス給電を研究の大テーマとする。その中でも特にnarrow beam型と呼ばれる、ワイヤレス電力をビーム状にしてユーザー集中し、高効率に空間を伝送して大電力の利用を可能とするシステムを設定し、中テーマとする。Narrow beam型ワイヤレス給電は、国内で今年制度整備が行われる室内のwide beam型ワイヤレス給電(複数ユーザーへ同時にワイヤレス給電を行うタイプ)の次ステップとして位置づけられ、申請書が代表を務める企業40社が参加するコンソーシアムで、次に総務省へ制度整備を要求すべく議論を開始しているものである。Narrow beam型の実用化は電波の安全性や干渉低減の議論が必須であり時間を有するが、有線に代わることのできる、かつ移動体への給電も可能なその実現が期待されるワイヤレス給電である。Narrow beam型ワイヤレス給電は技術的には高効率ビーム形成、移動体の位置追尾の高精度化、大電力発振/増幅回路及び半導体、及び大電力受電整流回路等が求められる。本研究では小テーマ(主テーマ)としてまず高効率大電力受電整流回路の開発を目標として掲げる。

本研究で想定するシステムは電気自動車の空間伝送型ワイヤレス充電システムである(図)。システムの小型化のために周波数は5.7GHz帯を選択する。現在ITUでrecommendationされ、国内でも省令改正が行われた電気自動車の結合型ワイヤレス充電は7.7kW(85kHz)であり、本研究でも充電電力は7.7kWを目標としたい。受電アンテナアレー面積を1m角とすると、5.7GHzのアンテナは約1,000素子配置可能であり、1受電アンテナ及び整流回路当たり10W弱の出力が必要と計算される。これまで5.7GHz帯の受電整流回路で10W以上の整流を高効率で実現した例はほぼなく、本研究がまず10W出力で変換効率70%を目標としたい。研究の進展によってはより高出力の受電整流回路の実現も目指す。

一般に受電整流回路は高効率を実現可能であるショットキーバリアダイオードを用いた整流回路か、小型化のためにMOSFETを用いたMMIC型整流回路がほとんどである。学術的にはこの半導体の最大電力が受電整流回路の最大出力を決める。本研究では半導体の開発自体は行わないため、既存の半導体を用いて回路の工夫で高効率化、大電力化を図るしかない。これまで、空間伝送型ワイヤレス給電のための整流回路では、非常に弱い電力で高効率化を図るための様々な回路の工夫がなされてきた。しかし、回路の工夫によって大電力化を実現したのは、申請者の過去の研究による電力分配器付き整流回路しか例がない。電力分配器付き整流回路はある程度受電エリアが大きく取れるような応用(例えばワイヤレス給電ビルディング等)では有効であるが、電気自動車のような受電面積やその厚みが制限されるような応用には適さない。本研究では

ダイオードを用いた弱電用整流回路の高効率で用いられる回路のインピーダンスの調整等を用い、回路設計にて大電力化高効率化を図ることが世界初の試みとなる。弱電用整流回路では弱いマイクロ波入力が高効率を実現するために、ダイオードに以下に電圧をかけるかが設計ポイントであった。これを応用すれば、逆に大電力用整流回路ではいかにダイオードにかかる電圧を下げるかがポイントとなり、そのような回路設計を行う計画である。またこの回路設計手法を弱電力から大電力まで整理/統合することで、マイクロ波帯での整流回路理論を発展させることができる。またこれらと並行し、ダイオードではなく、GaN HEMT や HBT 等大電力用の 3 端子半導体を整流回路に応用する研究も行う。大電力用のダイオードはこれまで開発例が少なく、市販品もないため、回路の工夫を行うのであるが、近年は GaN の発展により増幅器用の HEMT や HBT 等であれば入手可能であるため、リジットの整流回路ではあまり例のない HEMT 等を用いた大電力整流回路の開発も行う。

3. 研究の方法

先述のように、本研究では空間伝送型ワイヤレス給電のうち、narrow beam 型ワイヤレス給電のための大電力受電整流回路の開発、が主目的となる。大電力受電整流回路では開発例が少ない周波数 5.7GHz で 10W 出力、効率 70%以上を目標とする。手法は 2 つ、1) 既存ショットキーバリアダイオードを用いた受電整流回路を、弱電用整流回路で用いられる手法論である回路インピーダンスの最適化等で高効率化を図る、2) 並行しリジットの整流回路ではあまり例のない HEMT 等 3 端子半導体を用いた大電力整流回路の開発、である。

初年度には回路シミュレーションを中心とした開発を行う。回路シミュレーションはダイオードはもとより、3 端子半導体でも大電力パラメータが不足しており、半導体パラメータの推定から行う必要がある。これまでの経験で特にダイオードのブレイクダウン電圧前後からそれを超える電圧での動作時の回路シミュレーションは実際の結果を合わなくなることが多く、半導体パラメータの推定が必須となる。これは実験による半導体パラメータの推定を行いつつ、回路シミュレーションとのフィードバックを繰り返すことで精度をあげていく。また 3 端子半導体を用いる整流回路では、その回路設計から未知の部分が多く、回路シミュレーションによる試行錯誤を繰り返し、設計を進めざるを得ない。

次年度には設計した整流回路を実際に試作して効率測定を行うとともに、より高効率化を目指す。この段階で設定した電気自動車に最適な半導体や回路を選び、その方式に絞って研究開発を行う。

最終年度には整流回路をアレー化して、システムとして要求仕様を満たすかの評価を行う。受電整流回路にアンテナを取り付けた空間伝送型ワイヤレス給電実験ができればベストと考えるが、ミニマムでも複数の整流回路のアレー化とその最適化を行う。整流回路のアレー化による弊害は過去の申請書の研究で判明しており、その知見に基づき、また大電力化による問題点解決(出力の大電流化による熱対策など)を加えて、目標システムに最適最高の受電整流回路を開発し、研究をまとめる。

4. 研究成果

本研究ではまず空間伝送型ワイヤレス給電で主に用いられる整流回路方式であるシングルシャント整流回路、チャージポンプ整流回路、フルブリッジ整流回路の動作原理を確認しさらに、整合回路がついた時のシングルシャント整流回路、チャージポンプ整流回路、フルブリッジ整流回路の大電力化に関する理論計算を行い、3 方式の整流回路におけるダイオードを最大のパフォーマンスで動作させた場合、最大入力電力はシングルシャント整流回路に比べて、チャージポンプ整流回路が 2 倍、フルブリッジ整流回路が 4 倍の電力を入力できることを示した。その時の負荷抵抗はチャージポンプ整流回路がシングルシャント整流回路の 2 倍、フルブリッジ整流回路とシングルシャント整流回路は同じである。実際のダイオードモデルを用いても 3 方式の整流回路が理論計算と同じ結果になることをシミュレーションによって確認した。この結果、通常弱電用整流回路で用いられるチャージポンプ整流回路を用いたとしても、回路インピーダンスの最適化等を行い設計することで、整流回路の大電力化が図れた。

さらに従来用いられてきた F 級負荷型シングルシャント整流回路に加え、新たに R 級負荷型シングルシャント整流回路を考案し比較検討を行った。その結果、理想ダイオードを用いた整流回路ではそれぞれほぼ 100%近い RF-DC 変換効率を実現したものの、整流波形を確認したところ、F 級負荷型整流回路の方が電圧振幅が小さいため負荷抵抗を大きくすることができる。言い換えると、ダイオード電流の時間平均を小さくすることができることが分かった。ショットキーバリアダイオードの故障原因はダイオード電流の過大による熱暴走であることから、F 級負荷型整流回路のほうが R 級負荷型整流回路に比べて大電力に向くという結論となった。実際に製作した整流回路で RF-DC 変換効率を測定した結果、F 級負荷型では入力電力 3.96W の時に効率 68.5%、出力電圧 11.7V であったのに対し、R 級負荷型では入力電力 4.22W の時に効率 74.0%、出力電圧

14.8V と、F 級負荷型のほうが電圧が低く出るために大電力に向くことが分かった。

整流回路単体では 70%以上の目標は達成したものの、出力 10W が達成していないため、複数の整流回路を接続してアレー化を行い、narrow beam 型ワイヤレス給電に最適なシステム開発を目指した。Narrow beam 型ワイヤレス給電の一例として、ドローンへのワイヤレス給電システムを想定し、本研究で得た設計知見を活かして軽量大出力の整流回路付きアンテナ(レクテナ)アレーを開発した。16 素子アレーレクテナによって、43.6W、5.7GHz 入力から 61.9%の変換効率で直流を発生することに成功した。Narrow beam 型ワイヤレス給電の場合はレクテナアレーに理想の(均一・最適な電力の)マイクロ波ビームをあてることが難しく、効率の低下がみられるが、ドローンの飛行には十分な直流電力を得ることができ、narrow beam 型ワイヤレス給電のための大電力受電整流回路の開発は成功したといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Koki Miwatashi, Takashi Hirakawa, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mltani	4. 巻 2
2. 論文標題 Development of High-Power Charge Pump Rectifier for Microwave Wireless Power Transmission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Microwaves	6. 最初と最後の頁 711,719
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JMW.2022.3204434	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0件

〔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
---------	---------