

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06353

研究課題名(和文) IoT用電磁波エネルギーハーベスティングのための高効率昇圧整流回路の開発研究

研究課題名(英文) Study on New Charge Pump Rectifier for Harvesting of Ambient Radio Waves for IoT

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では周辺の弱い電磁波から高効率で電気エネルギーを得るための新しいレクテナ(ダイオード整流器付アンテナ)、特に弱い電力でも高効率で所望電圧を発生できるレクテナ整流回路の研究開発を行なった。世界的には弱い電力でも所望の電圧を得ることが出来るCharge Pump整流回路の研究開発が進んでいる。しかし、Charge Pump整流回路は多数のダイオードとキャパシタで構成されるため、高い効率を得ることが出来ない。そこで、本研究ではこれまで申請者が研究開発を行ってきたSingle Shunt整流回路とCharge Pump整流回路をマージした新しい整流回路を考案し、その研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弱い電力でも高効率で所望電圧を発生できるレクテナ整流回路を用いると、周辺の弱い電磁波から電気エネルギーを得ることが出来るため、この技術は電池や電源が不要な新しいエネルギーソースとして期待されている。この技術はあまり大きな電力を必要としないIoTセンサー等の電池レス化・コードレス化に適しているとされ、本研究の成果は今後のIoT社会の実現に寄与できるものと考えられる。また外部にマイクロ波エネルギーの送電装置を備えればさらに能動的にかつより大きなワイヤレスな電力を送ることも可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, I developed new rectifier for a rectenna (rectifying antenna) to harvest ambient weak radio waves with high conversion efficiency to electricity. The new rectifier can create high voltage with high efficiency from weak radio waves. There are a lot of research and development of Charge Pump rectifier which can create high voltage with high efficiency from weak radio waves. However, the efficiency of the Charge Pump rectifier is poor because it consists of many diodes and capacitances. So I proposed new rectifier which is merged with a Single Shunt rectifier and the Charge Pump rectifier and developed it.

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 整流回路

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2006年にMITにより提唱された共振カップリングを用いた非接触給電は瞬く間に広がり、近年次々と商品化が始まっている。電磁界現象を用いて無線で電力を伝送する研究は1960年代から本格化しているが、これまではマイクロ波という電磁波を伝播させての無線電力伝送がすべてであり、このマイクロ波送電は大きすぎるシステムサイズとコストの問題でこれまで実用化には至らず、宇宙で発電した電力を地上へマイクロ波送電しようという宇宙太陽発電所構想のためのみに研究が行われてきた。MIT提唱の方式はマイクロ波と同じ基礎方程式で表される電磁界現象を利用しているが、システムが簡便でユーザー要求(無線の距離や効率等)に十分な性能を有するため、50年以上研究段階に留まっていた無線電力伝送がここ数年で一気に広がった。MIT方式は家電や電気自動車等の1m以下程度の無線給電には適しているが、マイクロ波方式は数m以上の長距離・複数目標への無線給電に適している。

提案者はこれまで20年以上に渡りマイクロ波方式の無線電力伝送の研究を行っており、宇宙太陽発電所応用だけでなく、携帯電話の無線充電や電気自動車への無線給電、マイクロ波を用いたコードレス建物等、様々な応用研究を行ってきた。マイクロ波方式の無線電力伝送を実用化しようとする場合、周波数干渉対策や電磁波の安全性の課題の議論が必要で、いきなり大電力のアプリケーションの実用化は難しい。そこで注目されるのが通信と同程度の弱い電力を用いた無線電力伝送システムや、通信や放送で用いられている電波を収穫(ハーベスティング)して電力として再利用する電磁波ハーベスティングである。世界的にもIoT(Internet of Things;ものインターネット)への応用を期待した弱い電力を用いた無線電力伝送システムや電磁波ハーベスティングの研究が活発に行なわれている。

### 2. 研究の目的

これらの応用のために必須なのが弱い電力でも高効率で所望電圧を発生できるレクテナ整流回路である。世界的には弱い電力でも所望の電圧を得ることが出来るCharge Pump整流回路の研究開発が進んでいる。しかし、Charge Pump整流回路は多数のダイオードとキャパシタで構成され、整流と昇圧を同時に行なうために、所望電圧はその回路段数を増やすことで用意に得られるが、損失が段数に比例して大きくなり、高い効率を得ることが出来ない。効率が低いと電力システムとしては不適であるといわざるを得ない。そこで、これまで申請者が研究開発を行ってきたSingle Shunt整流回路とCharge Pump整流回路をマージした新しい整流回路を考案し(図1)、その研究を提案する。

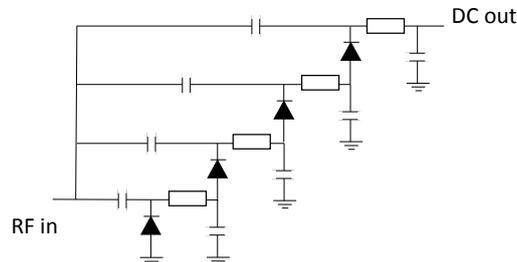


図1 提案する高効率昇圧整流回路

### 3. 研究の方法

Charge Pump整流回路とは基本回路として半波倍電圧整流回路を用い、これを多段化して整流と昇圧を同時に行なうものである。この半波倍電圧整流回路の代わりにSingle Shunt整流回路を用い、多段化することでSingle Shuntの高効率とCharge Pumpの昇圧の利点を併せ持つ回路を提案する。予備的なシミュレーションにより、同じダイオードを用いた半波倍電圧回路よりもSingle Shunt整流回路のほうが10%以上高効率化することがすでに分かっている。本研究ではSingle Shunt整流回路の多段化に伴う問題点の整理(多段接続によるダイオードバイアスの変化し、その結果1素子と異なる動作をしないか、整流回路のアレー化の際に起こる接続による電流電圧の動作点の移動の弊害が起こらないか等)と、最適化し高効率化を行なう整流回路の研究開発を行なう。

システムで想定するのは電磁波ハーベスティングによるIoT用低電力センサーである。必要に応じハーベスティングでなくマイクロ波無線電力伝送システムも検討する。周波数は無線LANで用いられている2.45GHzや、RF-IDで用いられている920MHzを想定する。

### 4. 研究成果

まずCharge Pump整流回路の要素回路であるダイオード2つを用いた半波倍電圧整流回路に着目し、その動作解析と損失に関する理論解析、シミュレーション、及び試作評価を行なった。周波数は2.45GHz帯で行った。その結果

- Single Shunt整流回路とCharge Pump整流回路の変換効率を理論的解析し、同じ変換効率になることを証明

- ・実験結果とシミュレーション結果の差について分析
- ・多段 Charge Pump 整流回路では、ダイオードによる損失は一段整流回路と同じとなることを証明した。

さらに Charge Pump 整流回路に F 級共振回路を取り付け、Single Shunt 整流回路と 1 段の Charge Pump 整流回路をマージした形の新しい整流回路の開発を行った(図 2, 図 3)。実験結果として、最適負荷 1300 ohm において最高変換効率約 71%を実現し、マイクロ波反射率はシミュレーション結果とほぼ一致した(図 4)。しかし、最適負荷近傍において、実測結果とシミュレーション結果の差がやや異なっていたため、実測結果とシミュレーション結果の差の分析と対策を行い、ダイオードと線路特性インピーダンスの整合条件について検討した結果、異なる特性インピーダンスを持つ先端線路は回路全体の反射成分に強い影響を及ぼすことが分かった。この結果を踏まえ、2 段チャージポンプ整流回路の設計開発も行い(図 5)、45%の変換効率を実験で実現した(図 6)。

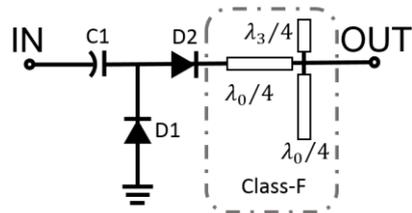


図 2 F 級負荷を導入した Charge Pump 整流回路



図 3 開発した F 級負荷を導入した Charge Pump 整流回路

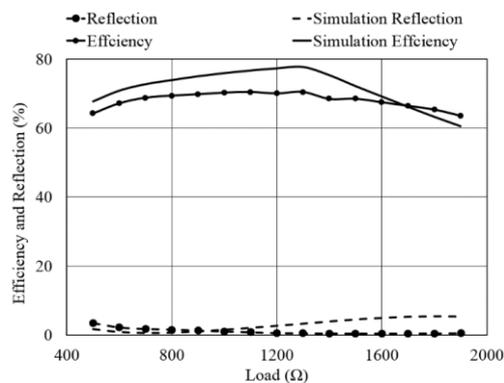


図 4 F 級 Charge Pump 整流回路の変換効率と反射率

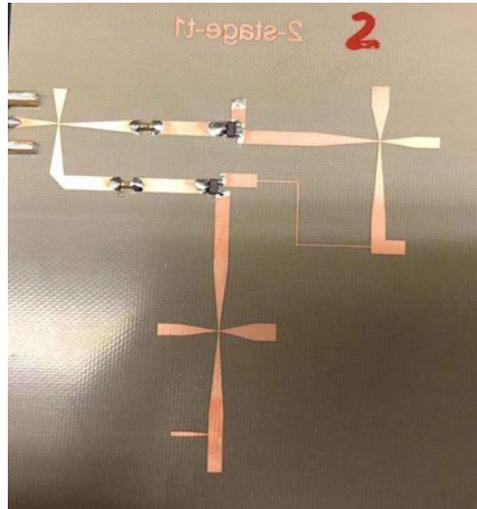


図5 開発した2段チャージポンプ整流回路の写真.

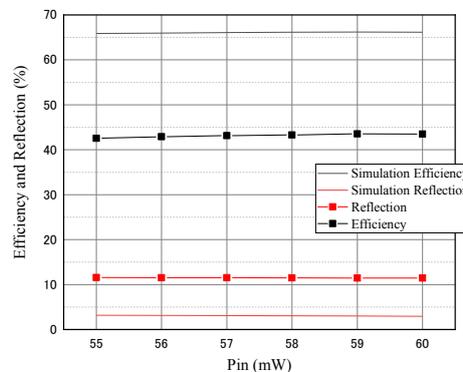


図6 開発した2段チャージポンプ整流回路のシミュレーション結果と実測結果

また開発した新しい整流回路の適用先として人工衛星内で用いる IoT 用低電力センサーを想定し、システム検討も行った。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件, +投稿中 1 件)

- ① Ce Wang, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, “Study on 5.8 Ghz Single-stage Charge Pump Rectifier for Internal Wireless System of Satellite”, IEEE-Trans. MTT, Vol.65 , No.4, pp.1058-1065, 2017
- ② Ce Wang, Bo Yang, Seishiro Kojima, and Naoki Shinohara, “The Application of GHz Band Charge Pump Rectifier and Rectenna Array for Satellite Applications”, submitting to Wireless Power Transfer, conditional accept, 2019

[学会発表] (計 6 件)

- ① 王策, 篠原真毅, 三谷友彦, “人工衛星内部無線システム用多段チャージポンプ整流回路の設計”, 第 19 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 2019
- ② (invited) Naoki Shinohara, “Recent Wireless Power R&D in Japan and in the World”, 2018 Korean Wireless Power Promotion Forum (KWPF), 2018
- ③ (invited) Naoki Shinohara and Ce Wang, “Novel Rectifier for low power far field WPT and energy harvesting”, 2018 International Wireless Symposium, 2018
- ④ Ce Wang, Seishiro Kojima, Yang Bo, Daichi Nishio, Tomohiko Mitani, and Naoki Shinohara, “The Relationship between the Class-F Charge Pump Rectenna Array and the DC Load”, 3rd Asian Wireless Power Transfer Workshop 2017, 2017
- ⑤ 王策, 篠原真毅, 三谷友彦, “5.8GHz 人工衛星内部ワイヤレスシステム用チャージポンプ整流回路の設計と応用”, 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, 2018
- ⑥ Ce Wang, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, “Study on 5.8 GHz Single-Stage Charge Pump Rectifier for Internal Wireless System of Satellite”, 11th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP2017), 2017

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：篠原真毅

ローマ字氏名：Naoki Shinohara

所属研究機関名：京都大学

部局名：生存圏研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：10283657

### (2) 研究協力者

なし

※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、研究者個人に帰属されます。