

弱電レクテナの整流過程の研究

Study on Rectifying Process of Low Power Rectenna

檜崎 諒介

Ryosuke Narasaki

篠原 真毅

Naoki Shinohara

京都大学生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

1 研究背景と目的

アンテナと整流回路を接合したものをレクテナと呼ぶ。これはマイクロ波の無線電力伝送において用いられる。これまでに開発されたレクテナではダイオード一つを分布定数線路に並列に挿入し、 $\lambda/4$ 線路とコンデンサを組み合わせた出力平滑フィルタを用いる全波整流回路(シングルシャントモデル)がよく用いられ、またこれらのレクテナのほとんどは100mW以上のマイクロ波入力においてRF-DC変換効率が最大になるように設計されている[1]。しかしエネルギー問題への対策として考えられている「Energy Harvesting」や「ユビキタス電源」では、レクテナで受け取るマイクロ波電力は数mW以下であることが多い。このように入力電力が1mW程度でRF-DC変換効率が最大になるようなレクテナを弱電レクテナと呼ぶ。そこで現在、 $\lambda/4$ 線路を用いない改良型シングルシャント整流回路が設計、評価されており、実際にRF-DC変換効率50%以上の弱電レクテナが開発されている[2]。しかしながらこれらは計算機シミュレーションと実験によるものであり、その動作原理は解明されていない。そこで本研究では、弱電レクテナのシミュレーションによる詳細な動作原理の検証からはじめ、その動作原理を解明し、その設計指針を明確にすることを目的とする。

2 ADSによるシミュレーション

弱電レクテナの整流理論を解明していくために回路解析シミュレーターADSを用いて図1に示す回路を解析した。従来の整流理論では出力フィルタの線路の長さに注目していたが、本研究は出力線路の電気長、挿入線路の電気長と挿入スタブの特性インピーダンスと電気長に注目してシミュレーションを行なった。なお今回は入力電力1mW、周波数2.45GHz、直流カットコンデンサ $C_1 = 820\text{pF}$ 、高調波カットコンデンサ $C_2 = 820\text{pF}$ 、負荷抵抗 $R_L = 2.0\text{k}\Omega$ 、線路の特性インピーダンス $Z_0 = 200\Omega$ とした。今回のシミュレーション結果より5次以上の高調波は基本波に対して十分振幅が小さいので、今回は直流成分、基本波、2次高調波、3次高調波、4次高調波のみ考慮して検証していく。

2.1 $\lambda/4$ 線路を用いない高いRF-DC変換効率をもつ弱電レクテナ

出力線路の電気長に対して最適な挿入線路の電気長と挿入スタブの電気長と特性インピーダンスを回路解析シミュレータADS上の最適化関数を用いて計算した。この

時の出力線路の電気長と挿入線路の電気長の関係を表1に示す。出力線路が45deg、60deg、90degのとき挿入スタブの電気長と特性インピーダンスはそれぞれ50.4degと43.5 Ω 、49.1degと89.1 Ω 、39.1degと39.1 Ω とした。

すなわち $\lambda/4$ 以外の長さの出力線路を用いても、入力側のインピーダンス整合を取ることさえできれば、RF-DC変換効率が70%以上の高効率弱電レクテナを実現することが可能であることがわかった。これは従来の $\lambda/4$ 線路を用いた理論では説明できない。 $\lambda/4$ 線路を用いずに高いRF-DC変換効率を実現出来ている理由として、インピーダンス整合を取るための挿入線路と挿入スタブが出力側で発生した高調波を閉じ込めるフィルタの役割を果たすことで高効率を実現していると考えられる。これは今後検討していく。

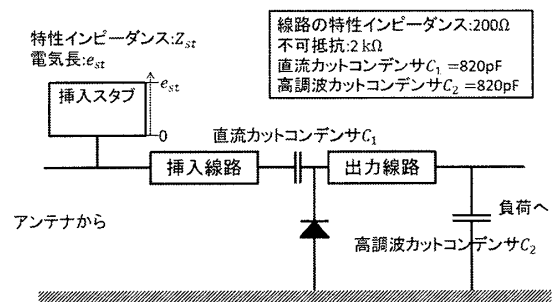


図1 弱電レクテナの等価回路

表1 出力線路とRF-DC変換効率の関係

出力線路長	挿入線路長	RF-DC変換効率
45deg	135deg	75.3%
60deg	120deg	74.5%
90deg	90deg	75.3%

2.2 線路上の電圧電流定在波

前節の結果を受けて、線路上での電圧と電流の振る舞いを調べるために挿入線路と出力線路上の電圧定在波の形を調べた。出力線路120deg、挿入線路60degとしたときの電圧定在波を図2に示す。この時挿入スタブの特性インピーダンスと電気長は49.1degと89.1 Ω とした。120degの部分にダイオードが接続されている。電圧定在波はダイオードの接合位置に電圧定在波の腹があることを示している。電圧定在波のダイオード接合位置の電

圧が上昇しているのは直流カットコンデンサに電荷が溜まって直流電圧が発生するからである。同じ回路の電流定在波を図3に示す。電流は挿入線路の左端と出力線路の右端が大きく振動していることがわかる。ダイオード接合位置において、電流が不連続に変化している。これはダイオードに電流が両方向に流れているからである。図4には基本波のみ、図5には2倍波の電流定在波を示している。これによりダイオードには基本波と直流成分が流れていることがわかる。図5より、2倍波にはダイオードは開放であるように見えると考えられる。ダイオード損失は直流成分と基本波の電流によって生じていることがわかる。従来の整流理論ではダイオードには順方向の電流しか流ないはずなので、弱電レクテナは従来の整流過程とは違う動作をしていると考えられる。

3 まとめと今後の取り組み

3.1 まとめ

本稿のシミュレーションでは以下の3点が分かった。

- $\lambda/4$ 線路を用いなくても、入力側のインピーダンス整合をとりさえすれば高い RF-DC 変換効率を持つ弱電レクテナを実現できることがわかった。
- 挿入線路と出力線路上での電圧定在波を検証した。これによりダイオードの接合点に定在波の腹が出来ていることがわかった。
- 電流定在波を検証することでダイオードには直流成分と基本波が流れており、両方向の電流が流れていることがわかった。ここからダイオード損失は直流成分と基本波によって生じていることがわかった。

3.2 今後の取り組み

今後は以下の3点に注目して研究を行っていく。

- 入力側のインピーダンス整合を取るための挿入線路と挿入スタブが高調波に対してどのような働きをするのかやフィルタとして動作しているのかを検証していく。
- $\lambda/4$ 線路を用いなくても、入力側のインピーダンス整合をとりさえすれば、高い RF-DC 変換効率を実現できることを実際にレクテナを作成して確かめていく。
- 今回の電圧定在波のデータを解析することでどのように出力線路上の高調波が作用して、直流成分が発生するのかを解明していく。

参考文献

- [1] K. Hatano *et al.*, "Development of Class-F Load Rectennas", IMWS-IWPT 2011, IWPT-P-15, Proceedings pp.251-254, 2011.
- [2] 篠原真毅 他, "mW 級高効率レクテナの開発", 信学技報 SPS2004-08, 2005.

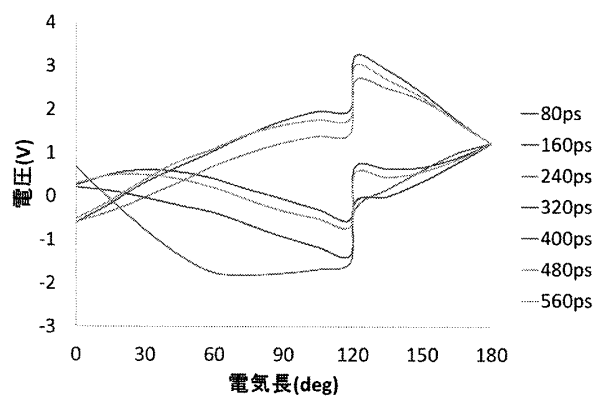


図2 電圧定在波

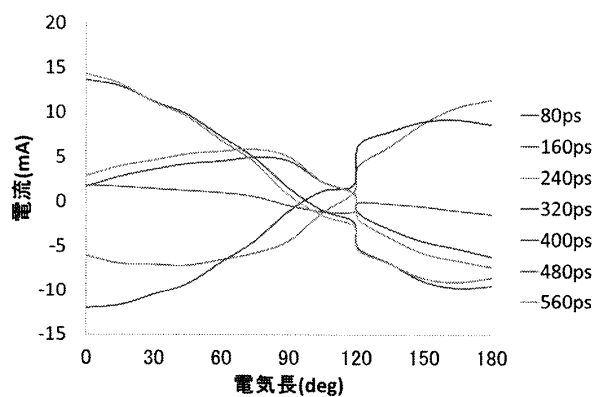


図3 電流定在波

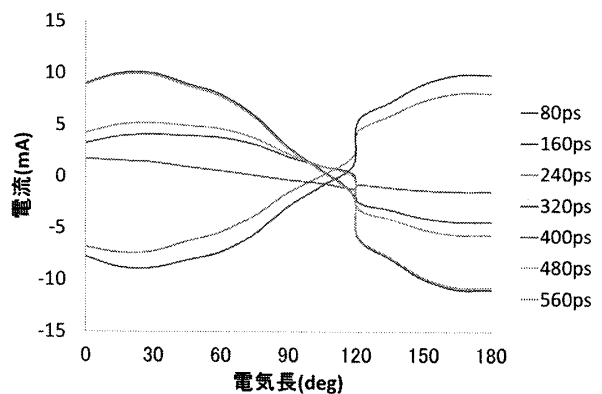


図4 基本波の電流定在波

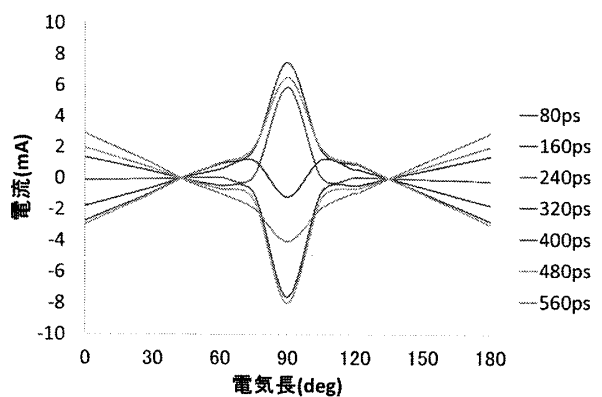


図5 2倍波の電流定在波