

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	河合 勝己
論文題目	Novel Rectenna Design Methods for Wireless Power Transfer Systems (無線電力伝送システムに向けた新しいレクテナ設計手法に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は空間伝送型無線電力伝送における高効率レクテナ及び 2 次高調波再放射レクテナの設計手法についてまとめたものである。レクテナの最大整流効率は整流ダイオードの理論整流効率に制限される。したがって、高効率レクテナの実現にはダイオード周辺回路の損失を可能な限り低減し、ダイオードの理論整流効率を引き出すことが重要となる。本研究ではダイオード周辺回路の損失を低減する方法として、(1)出力フィルタで整合を行うシングルシャント型整流回路の設計手法、(2)受電アンテナと整流回路を直接接続する設計手法の 2 つを提案している。また、(2)を応用して 2 次高調波を再放射するレクテナを開発している。本論文は全 5 章で構成される。本論文は 2 章において(1)の 50Ω 整合する場合のレクテナの設計手法を、3 章において(2)の非 50Ω としてアンテナと整流回路を直接接続する場合のレクテナ設計手法をまとめている。4 章において(2)を発展させた高調波を再利用するレトロディレクティブシステム用レクテナの開発についてまとめている。以下に各章の概要を示す。</p> <p>第 1 章は序論であり、初めに研究背景として無線電力伝送の研究に関する歴史についてまとめている。次に、無線電力伝送におけるレクテナの高効率化の重要性について述べ、レクテナの総合整流効率の観点からレクテナ設計の研究課題について整理している。レクテナの総合整流効率の構成要素の内、本論文ではインピーダンス整合及び高調波処理に焦点を当て、単一ダイオードレクテナの高効率化設計についてまとめることを述べている。</p> <p>第 2 章では、シングルシャント型整流回路の出力フィルタで高調波処理だけでなく、インピーダンス整合も行う新たな回路構成を提案している。整流回路の高効率化において、基準インピーダンスへの整合による整合損失を低減する設計が重要である。従来のシングルシャント型整流回路の出力フィルタには $\lambda/4$ 線路と並列接続のキャパシタが用いられる。本研究では、従来の出力フィルタの $\lambda/4$ 線路上の入力インピーダンスの変化に着目した。本研究は RF 給電点を $\lambda/4$ 線路上に設けることでインピーダンス整合を行う構造を提案した。提案回路によってインピーダンス整合が可能なダイオードの基本波入力インピーダンスの条件を伝送線路によるインピーダンス整合理論を用いて明らかにした。シングルシャント型整流回路の基準インピーダンスへの整合経路を従来及び提案手法で比較した。シミュレーションでの比較により、従来のオープンスタブを用いた整合回路よりも提案した出力フィルタでの整合の方が、整合経路がスミスチャート上でより短くなり低損失であることを示した。GaAs ショットキーバリアダイオードを用いた 920MHz 帯整流回路を設計し、測定及びシミュレーションによって提案構造で全波整流とインピーダンス整合の両方が達成可能であることを示した。設計した整流回路は 920MHz 帯整流回路における世界最高整流効率 91%を記録した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	河合 勝己
<p>第 3 章では、アンテナで高調波処理を行うことで整流効率を高める新たなシングルダイオードレクテナを提案している。整流ダイオードの整流効率を引き出すためには、ダイオードの整流動作で副次的に発生する高調波の処理が重要となる。従来のレクテナでは入力及び出力フィルタの両方で高調波処理を行っていた。本研究では、出力フィルタは簡素な回路構成として高調波処理の機能を受電アンテナに集約することで回路損失を削減し高効率を得るレクテナ構成を提案した。シングルシリーズ及びシングルシャントレクテナの特徴を比較し、シングルシリーズ型レクテナの方が高効率化設計において有利であることを示した。理想回路を用いたシミュレーションにより、アンテナで高調波処理を行うシングルシリーズレクテナの最大整流効率が 100%となることを示した。提案レクテナの設計手法として、高調波を含むソースプルシミュレーションを新たに導入した。高調波ソースプルシミュレーションによって、高効率を達成するために必要な各高調波におけるソースインピーダンス、すなわちアンテナ入力インピーダンスの範囲を得た。高調波ソースプルシミュレーション結果に基づいて逆 F アンテナの設計を行い、逆 F アンテナとダイオード側回路を直接接続したシングルシリーズレクテナを開発した。開発したシングルシリーズレクテナは他の先行研究と比較して、単一ダイオードで高い整流効率を有することを示した。</p> <p>第 4 章では、第 3 章で提案した高調波ソースプルシミュレーションを応用し、高い整流効率と高い 2 次高調波再放射レベルを有するレクテナの設計手法についてまとめている。2 次高調波をパイロット信号として再放射するレトロディレクティブシステムが提案されている。本システムでは、レクテナにおいて高い整流効率を維持しながら 2 次高調波を再放射することが求められる。高調波ソースプルシミュレーションによって、シングルシリーズレクテナの整流効率と 2 次高調波再放射のトレードオフ関係をスミスチャート上で明らかにした。2 次高調波を再放射しない従来のレクテナと 2 次高調波を再放射する提案レクテナのダイオード上の電力量内訳をシミュレーションで比較した。比較の結果、提案レクテナはダイオードの総合電力変換効率の変化なしに、2 次高調波を再放射していることを示した。他の 920MHz 帯レクテナの先行研究と比較し、開発したレクテナは同じ入力電力条件においてより高い 2 次高調波再放射レベルを有し、より小さな回路サイズであることを示した。</p> <p>第 5 章は結論であり、本研究で得られた成果とその成果による貢献が期待される分野について述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は空間伝送型無線電力伝送における高効率レクテナ及び2次高調波再放射レクテナの設計手法についてまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. レクテナではアンテナと整流回路のインピーダンス整合が重要となる。一方で整合回路は挿入損失を持ち整流効率を低下させる。本論文では、シングルシャント型整流回路の出力フィルタでインピーダンス整合と高調波処理の両方を行う新しい回路構造を提案した。提案構造の適用可能なダイオードインピーダンス範囲を明らかにした。提案した回路によって回路損失が低下し、整流効率が向上することを示した。提案構造を利用して製作し 920MHz 帯シングルシャント型整流回路は 920MHz 帯における世界最高整流効率 91%を達成した。
2. アンテナで高調波処理を行うことで、整合回路を必要とせずアンテナと整流回路を直結する新たなシングルシリーズレクテナを提案した。提案したレクテナの設計手法として、高調波を含むソースプルシミュレーションを新たに導入した。理想回路シミュレーションによって、アンテナで高調波処理を行うシングルダイオードレクテナにおいても理想効率 100%の全波整流が可能であることを示した。高調波を含むソースプルシミュレーションによって、ソースインピーダンスと整流効率の関係をスミスチャート上にプロットしたコンター図によって示した。提案構造でシングルシリーズレクテナを作成し、高調波処理をアンテナで行う提案レクテナは高調波処理を行わない場合よりも高い整流効率を有することを示した。
3. 2次高調波を再放射可能なシングルシリーズレクテナの高調波を含むソースプルシミュレーションを用いた設計方法を示した。ソースプルシミュレーションによって、これまで示されなかった整流効率と2次高調波再放射レベルのトレードオフ関係をスミスチャート上にプロットしたコンターで視覚的に明らかにした。提案した設計手法によって、ダイオードの総合電力変換効率を損なわずに整流効率の一部を2次高調波再放射に割り当てられることを示した。

以上を要するに、本研究の成果は空間伝送型無線電力伝送におけるレクテナの高効率化及び高調波再利用の応用設計に大きく貢献するものであり、マイクロ波帯及びミリ波帯レクテナやミキサ等の幅広い分野への発展が期待できる。本論文で得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年7月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し合格と認めた。