

氏 名 山本 綱之

授与した学位 博士

専攻分野の名称 工学

学位授与番号 博甲第4222号

学位授与の日付 平成22年 9月30日

学位授与の要件 自然科学研究科 産業創成工学専攻

(学位規則第5条第1項該当)

学位論文の題目 Highly Efficient RF-DC Conversion Circuits for Wireless Power Transmission

(無線電力伝送のための高効率な RF-DC 変換回路)

論文審査委員 教授 野木 茂次 教授 高橋 則雄 准教授 佐藤 稔

学位論文内容の要旨

近年、マイクロ波やミリ波といった高周波電磁波は無線通信のみならず、無線電力伝送用途としても利用されている。特に、化石燃料の枯渇という地球規模のエネルギー問題の解決策の一つとして、宇宙太陽光発電 (SSPS) が注目されている。

SSPS は 1968 年に P. Glaser が提唱し、アメリカ航空宇宙局が研究成果として SSPS の「Reference Model」を提案した。SSPS は、静止衛星に巨大な太陽電池パネルを配置して、天候に左右されることなく一日中、太陽光発電を行い、得られた電力をマイクロ波に変換して地上へ送電する。地上では、アンテナと RF-DC 変換回路とが一体となった、「レクテナ」と呼ばれるデバイスで衛星から送信されたマイクロ波を受電し、再び直流電力へと変換し電力網へと接続されることになる。日本においても SSPS の研究は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が中心となって進めており、2009 年に策定された「宇宙基本計画」の中で「宇宙太陽光発電研究開発プログラム」が提案され、SSPS の実用化に向けた実証実験が予定されている。無線電力伝送は SSPS のみならず、電気自動車への無線充電、RF-ID タグやセンサーへの給電等、様々なアプリケーションへの応用可能性を秘めている。

無線電力伝送において、最も重要な構成要素の一つがレクテナである。レクテナの RF-DC 変換回路は、マイクロ波ダイオードを用いるため、その非線形特性により交流-直流変換効率が入力電力に依存することが知られている。一般に、入力電力が大きいときに変換効率が高くなる傾向があるが、無線電力伝送システムを効率的に運用するためには、入力電力が低い場合でも高い変換効率を有する RF-DC 変換回路の実現が必要である。本論文では、mW 程度の入力電力に対しても、高い変換効率を有する RF-DC 変換回路の実現を目的として、まず回路理論的検討を行い、高い変換効率のための設計指針を得ている。さらに、非線形素子によって生じる高調波を含めて、回路素子、導波路及び電磁界の結合をも考慮することができる LE-FDTD 法による解析を行い、実験結果と比較し、RF-DC 変換回路の最適な設計パラメータ値を探索した。その結果、RF-DC 変換回路の設計において LE-FDTD 法による解析が有効であることを示し、65%以上の高い変換効率を有する RF-DC 変換回路の設計を明らかにすることができた。さらに、チップ素子のみを用いて RF-DC 変換回路を構成することにより、大幅な小型化と、不要放射抑制による変換効率の向上を実現できることをも示した。

さらに本論文では、超音波による無線電力伝送についても検討を行っている。近年の医療現場では心臓ペースメーカーやカプセル内視鏡等の生体内デバイスの利用が多くなっているが、これらの生体内デバイスに必要な内部電池の動作寿命により、電池交換の際に外科的手術が必要となるため、患者に対して肉体的、精神的苦痛を与えることになる。この問題を解決するために、医学的観点から電磁波よりも適していると考えられる超音波を利用する、生体内デバイスへの充電を目的とした無線電力伝送について基礎的な実験的検討を行い、超音波トランスデューサとの整合、受電側での昇圧回路の導入等が効率の向上に有効であることを示した。

論文審査結果の要旨

本論文は、マイクロ波を用いて無線で電力伝送を行う場合に、受電側でマイクロ波電力を直流に変換する回路についての精度の良い設計法を提示したものである。

地球規模のエネルギー問題の解決と二酸化炭素排出の抑制のための方法の一つとして、宇宙太陽光発電（SSPS）が注目されている。SSPSの構想では、静止軌道上の人工衛星に巨大な太陽電池パネルを配置して、天候に左右されることなく一日中、太陽光発電を行い、得られた電力をマイクロ波に変換して地上へ送電する。地上では衛星から送られたマイクロ波を、レクテナと呼ばれる、アンテナとマイクロ波から直流への変換（RF-DC変換）回路とが一体構成となったデバイスにより、受電して直流電力へ再変換し、電力網へと接続する。日本では、2009年に策定された「宇宙基本計画」の中で「宇宙太陽光発電研究開発プログラム」が提案され、SSPSの実用化に向けた実証実験が予定されている。無線電力伝送はSSPSのみならず、電気自動車への無線充電、RF-IDタグや各種のセンサーへの給電等、様々な応用を目指した研究開発が進んでいる。

無線電力伝送において、レクテナは最も重要な構成要素の一つであるが、RF-DC変換回路に用いるマイクロ波ダイオードの強い非線形性により、RF-DC変換効率が入力電力や負荷抵抗に依存し、さらに入力波の高調波が発生しその放射をも伴うので、設計が難しいとされてきた。本論文では、高い変換効率を有するRF-DC変換回路の実現を目的として、まず、ダイオード特性を測定して非線形性をも含めて適切なモデルで表現し、回路理論的検討を行うと共に、高調波を含め、集中回路素子とマイクロ波導波路及び電磁界の結合をも総合的に解析することができるLE-FDTD法による電磁界シミュレーションを行い、RF-DC変換回路の精密な最適設計を行うことに成功した。特に、レクテナでは、ダイオードの非線形性により入力電力が小さいときに変換効率が低下する傾向があるが、mW程度の入力電力に対しても、65%以上の高い変換効率を有するRF-DC変換回路の設計を得ることができた。さらに、チップ素子のみを用いてRF-DC変換回路を構成することにより、大幅な小型化と、不要放射抑制による変換効率の向上を実現できることをも示した。

本研究の成果は、レクテナに対する見通しの良い設計法を提供することになり、無線電力伝送の分野への重要な貢献となることが期待される。以上のことから、本論文は博士の学位に十分に値するものと考えられる。