

氏名（本籍）	おお た りょう すけ 太 田 涼 介（長野県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第1016号
学位授与の日付	2019年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	電磁誘導型非接触給電システムの電力変換回路による高効率化手法

論文審査委員	（主査）教授 星 伸一
	教授 榎田洋太郎 教授 木村 真一
	教授 早瀬 仁則 教授 小泉 裕孝

論文内容の要旨

電磁誘導を用いた非接触給電は、電気的接点を持たずにワイヤレスで電力を伝送できる技術で、デザイン性、利便性、安全性、バッテリーを有するシステムの小型化、および電力系統との接続に優れている。原理やシステム構築の容易性から、様々なバッテリー充電器への応用が期待されている。しかし、非接触給電システムには、有線の給電システムに比べて電力伝送効率が低いという課題が存在する。そこで、本研究は、電力伝送効率が低いという課題に対して、電磁誘導型非接触給電システムの電力変換回路を用いたシステム全体の高効率化手法の提案を行う。

これまでの電磁誘導型非接触給電システムの高効率化手法として、コイル形状の検討、二次側に接続する出力調整用コンバータ（以下、二次側コンバータ）によるコイルの負荷インピーダンス調整法、および電力変換回路へのソフトスイッチングの適用などがある。これらの、高効率化手法に関して、コイル形状の検討は伝送コイルの最大効率の引き上げ、二次側コンバータによる負荷インピーダンス調整は駆動時における高効率状態の維持、ソフトスイッチングは電力変換そのものの高効率化を目的としたものであり、同時にひとつのシステムに適用することも可能である。しかしながら、ソフトスイッチングの適用については、電力変換回路の回路方式によっては適用が難しく、ソフトスイッチングが可能な回路方式についても、バッテリーの充電サイクルを考慮すると、その方法は複雑化してしまう。ただし、本研究では、部分共振を利用したソフトスイッチングができない回路方式を、ソフトスイッチングの適用が難しい回路方式としている。

そのため、スナバコンデンサに対して適切な容量を設計できなかつた場合、良質なソフトスイッチングができなくなってしまう。そこで、本研究では、ソフトスイッチングが難しい電力変換回路に対しては、効率特性の解析手法の提案を行い、その解析結果に基づいた二次側の電力変換回路のスイッチング周波数制御による高効率化手法の提案を行う。

ソフトスイッチングが可能な電力変換回路に対しては、バッテリーの充電サイクルを考慮する過程を簡略化するための、視覚的にソフトスイッチング用スナバコンデンサの容量を評価できるマップを提案し、その設計指針を示す。そして、その設計指針に基づいて設計したスナバコンデンサを用いて、システムの高効率化を行う。

本論文は5章で構成されている。

第1章では、電磁誘導型非接触給電技術とその課題について述べる。さらに、一般的な電磁誘導型非接触給電システムの構成および、共振回路や各電力変換回路の特性について説明する。そして、これまでに提案された電磁誘導型非接触給電システムの高効率化手法について言及した後、本論文の目的と概要を述べる。

第2章では、ソフトスイッチングの適用が難しい、電磁誘導型非接触給電システムの二次側電力変換回路の高効率化に向けて、その電力変換回路の効率解析とその手法の提案を行う。この二次側の電力変換回路には、非接触給電システムの一次側と二次側コイルの結合状態が変化した場合にも、最終的な負荷であるバッテリーへの充電を安定できるよう、出力レンジが広い昇降圧型コンバータ（以下、二次側昇降圧型コンバータ）を適用している。本解析手法は、各スイッチングデバイスとインダクタの損失のモデル化を行い、非接触給電システムの特性に連動した二次側昇降圧型コンバータの各動作モードの回路方程式より導出した各部の電流と電圧と組み合わせて、非接触給電システムの効率特性を導出する。さらに、実験結果と解析結果を比較することで、高効率化に必要な条件を示す。

第3章では、第2章で行った効率解析の手法を用いて、非接触給電システムの二次側昇降圧型コンバータのスイッチング周波数特性を導出し、その周波数特性に基づいて制御する手法を提案する。実験では、その解析結果の妥当性を検証するとともに、その周波数特性に基づきコンバータを制御する提案手法と、スイッチング周波数を一定とする従来手法の比較を行う。加えて、従来の高効率化手法である、インピーダンスマッチングを用いた共振回路の高効率化手法と提案手法を複合する高効率手法の提案を行い、その有効性の検証を行う。

第4章では、ソフトスイッチングが適用可能な非接触給電システムの電力変換回路の高効率化手法について述べる。バッテリーの充電サイクルを考慮した上でソフトスイッチング用のスナバコンデンサの容量を設計する場合、バッテリーの電圧や充電の状況等、様々なパラメータを考慮する必要があるため、複雑化する。そこで、本章では、バッテリーの充電サイクルを考慮する過程を簡略化するための、視覚的にソフトスイッチング用スナバコンデ

ンサの容量を評価できるマップを提案し、さらなる高効率化を狙う。

第4章の流れとしては、その評価マップとその構築方法について説明する。その後、本システムのソフトスイッチング方法とその制御法について説明し、仮定した充電サイクルに基づいたソフトスイッチング用スナバコンデンサの容量の設計指針を示す。そして、実験にて、仮定した動作条件内におけるソフトスイッチングの確認を行い、提案手法の有効性を示す。

第5章では、提案手法の有用性をまとめ、今後の課題について言及する。

論文審査の結果の要旨

非接触給電システムは、携帯電話やスマートフォン、電動歯ブラシや電気シェーバーなど小容量のアプリケーションで実用化されているが、電気自動車への充電など容量の大きなアプリケーションへの適用も検討されている。中容量から大容量（数百Wから数kW）の非接触給電システムを普及させるために、システムの高効率化がより一層求められている。非接触給電システムには複数の方式があるが、本論文は電磁誘導型と呼ばれる方式を対象とし、上記の課題に対して、電磁誘導型非接触給電システムに用いられている電力変換回路により高効率化を図る手法を提案するものである。

電力変換回路を高効率化する手法の一つに、ソフトスイッチング技術がある。電力変換回路にソフトスイッチング技術を適用する一つの方法は、スイッチングデバイスと並列に適切な静電容量のキャパシタを接続することである。

これまでも、電磁誘導型非接触給電システムに接続された電力変換回路にソフトスイッチング技術を適用することで高効率化を行った研究成果が多く報告されているが、最適な静電容量に対する検討が十分ではなかった。この理由としては、適用する回路の動作モードやバッテリーの充電サイクルを考慮すると、その設計が複雑化してしまうことが挙げられる。これは、バッテリーの充電サイクルを考慮した上で、体系的に評価・設計する手法がなかったことに起因している。また、ソフトスイッチングはすべての電力変換回路に適用できるわけではなく、回路構成によっては余分なインダクタ、キャパシタやスイッチングデバイスを複数接続する必要がある。加えて、一つの回路でもソフトスイッチングが可能な動作領域と不可能な動作領域がある。

これらの課題に対して本論文では、ソフトスイッチングを適用できる電力変換回路に対してはスナバキャパシタの静電容量をより簡単に設計する手法、適用できない電力変換回路に対してはスイッチング周波数を変化させることで高効率化を図る制御手法が提案されている。

本論文は全5章から構成されており、第1章では、従来の高効率化手法と本論文の関係性、本論文の目的と概要などが示されている。

第2章では、ソフトスイッチングを適用できる電磁誘導型非接触給電システムの電力変換回路に対する、視覚的評価方法を用いたソフトスイッチング用スナバキャパシタの設計による高効率化手法が示され、その有効性が実験により示されている。

第3章では、ソフトスイッチングを適用できない電磁誘導型非接触給電システムの二次側電力変換回路の高効率化に向けて、その効率の理論解析が行われている。そして、コイル間の結合状態や共振回路の挙動とコンバータにおける発生損失との関係が明らかにされ、高効率化に必要な条件が示されている。さらに、実験により、解析結果の有効性が示されている。

第4章では、第3章で述べられている効率解析法を用いて、非接触給電システムの二次側昇降圧型コンバータのスイッチング周波数に対する効率特性が導出されている。さらに、その特性に基づいてスイッチング周波数を制御する高効率化手法が提案され、その有効性が実験によって示されている。加えて、従来の高効率化手法であるインピーダンスマッチングを用いた共振回路の高効率化手法と、本章で提案されたスイッチング周波数制御による高効率化手法を組み合わせた場合の検証が行われ、特定の動作域において有効であることが示されている。

第5章では、結論として、各章にて提案された高効率化手法の有用性がまとめられ、今後の課題について言及されている。

以上、本論文により、電磁誘導型非接触給電システムに対してソフトスイッチングが適用できる場合と適用できない場合のそれぞれについて、高効率化手法が提案され、実験により、それらの高効率化手法の有効性が明らかにされた。よって、本論文が博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと認められる。