

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20431

研究課題名（和文）トポロジー最適化によるワイヤレス電力伝送の効率最大化

研究課題名（英文）Topology Optimization of Wireless Power Transfer Devices to Maximize Those Efficiency

研究代表者

大友 佳嗣 (OTOMO, Yoshitsugu)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：60964442

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではワイヤレス電力伝送装置における磁気特性と回路特性の双方を考慮した上で、その電力伝送効率を最大化する新しいトポロジー最適化法を開発した。申請者の開発した最適化法はリッツ線内に生じる渦電流損失を容易に考慮できるため、実際の機器特性に則した最適形状を実現できる。提案法を用いて送受電コイル形状を最適化した結果、従来に無いキャップ状の磁気コア構造が得られた。これにより、コイル間位置ずれの有無によらず電力伝送効率を90%以上にまで改善できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車や航空機をはじめとする様々な輸送機械の電動化に伴い、充電の手間を大幅に軽減可能にするワイヤレス電力伝送の需要は日々増している状況にある。その中で、本研究において開発したワイヤレス電力伝送装置の最適設計法はシステム全体としての効率を大幅に改善できるため、社会的な利便性向上と省エネルギー化達成という二つの課題を解決することに寄与する。また、提案法は他のパワーエレクトロニクス関連機器にも適用可能であるため、高効率な電気機器の設計開発に広く貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a topology optimization method for wireless power transfer devices considering magnetic and circuit properties. In the proposed optimization, TX and RX coil shapes are determined by the parameter optimization for manufacturability, whereas the magnetic core shape is determined by the topology optimization. After the circuit parameters considering the eddy current loss in TX and RX coils are computed by using the homogenization-based finite element method, the power transfer efficiencies of the optimized WPT device are evaluated by using a SPICE simulation. It is clarified that the optimized WPT coils result in high efficiency over 90% even when there is a misalignment. This is due to the fact that the magnetic coupling and quality factors are improved by the cap-shaped magnetic core facing each other in TX and RX coils.

研究分野：形状最適設計

キーワード：ワイヤレス電力伝送 トポロジー最適化 パラメータ最適化 電力伝送効率 パワエレ回路 交流損失
解析

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力ケーブルの直接接続を必要としないワイヤレス電力伝送により、停車中や走行中の電気自動車(EV)を充電し、ユーザの利便性を向上することが期待されている。ワイヤレス電力伝送は路面に設置される送電コイルと、車体下部に設置される受電コイル間の電磁誘導現象を充電に利用する。同様の原理を用いる変圧器とは異なり、EVの走行状況や停止位置により送受電コイル間の相対的な空間位置関係は様々に変化する。このことは、電力伝送効率の悪化を招くと同時に、人体を害する漏れ磁界を周辺環境に生じる恐れがある。そのため、安定したワイヤレス電力伝送を行うには、コイル間の相対差に対する磁気結合を改善する必要がある。

申請者はこれまで、ワイヤレス電力伝送の主要構成部である送受電コイルに着目し、その形状をトポロジー最適化により決定する手法を開発してきた。しかし、申請者がこれまで検討してきた最適化は、送受電コイル間の磁気特性改善に限定されており、回路全体としての効率改善に対する効果は不明であった。そこで、ワイヤレス電力伝送装置における磁気特性と回路特性の双方を考慮した上で、その効率を飛躍的に改善する最適設計法を開発する本研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ワイヤレス電力伝送における回路負荷特性やコイル間相対差を考慮した送受電コイルのトポロジー最適化法を確立し、システム全体の効率を飛躍的に改善することである。本手法により、米国 SAE が定める電力効率の国際基準(SAE 基準) 85%を大幅に上回る、電気的および磁氣的に高性能なワイヤレス電力伝送を実現可能とする。

3. 研究の方法

ワイヤレス電力伝送装置における磁気特性と回路特性の双方を考慮した形状最適設計を実現するため、図 1 に示す最適化フローを本研究において新たに構築した。以下に各ブロックの概略をまとめる。

- (1) コイル形状は実製造性を考慮するため図 2 に示すパラメータ最適化により決定し、磁気コアは新規形状を実現するため図 3 に示すガウス基底関数を用いたトポロジー最適化により決定する。
- (2) コイル巻線に対する微細な有限要素分割を不要にする均質化有限要素解析により、コイル巻線に生じる渦電流損失を考慮した磁気特性を解析する。これにより、送受電コイルの交流抵抗を含む回路パラメータを容易に導出できる。
- (3) 図 4 に示すワイヤレス電力伝送装置の等価回路を SPICE により評価することで、最適化された送受電コイルの磁気特性とシステム全体の回路特性を同時に考慮した効率が評価可能になる。回路効率の評価におけるフローは図 5 のように設定した。
- (4) 提案法においては 3 次元有限要素解析および、SPICE による回路評価が必要になるため、その計算負荷は決して小さくない。そこで、遺伝的アルゴリズムと比較し個体数ならびに、世代数が少なく済む共分散行列適応進化戦略(CMA-ES)を最適化アルゴリズムに採用した。

4. 研究成果

本研究課題では負荷抵抗の出力を 50V, 120W とする制約の下、コイル間位置ずれの有無によらず効率を最大化する最適化問題を解いた。図 6 に示す送受電コイル最適形状は、従来の送受電コイルに見られないキャップ状の磁気コア構造を有している。これにより、図 7 に示すように送受電コイル間の実効的な鎖交磁束が増大し、位置ずれの有無によらず 90%以上の電力伝送効率を達成するに至った。また、キャップ状の磁気コア構造は図 4 における等価回路において、効率に直接影響を与える Q 値の改善に寄与している。このように、提案法はワイヤレス電力伝送装置における磁気特性と回路特性を飛躍的に改善しながら、全く新しいコイル形状を実現できると明らかにした。本法は他のパワーエレクトロニクス関連機器の最適設計にも適用可能であり、広く電気機器の特性改善に寄与できる。

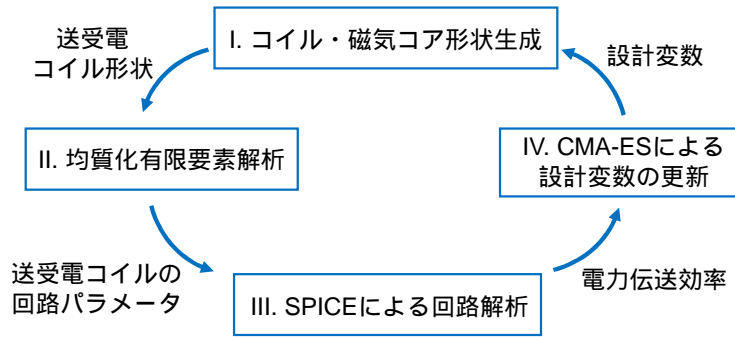


図1 最適化のフロー

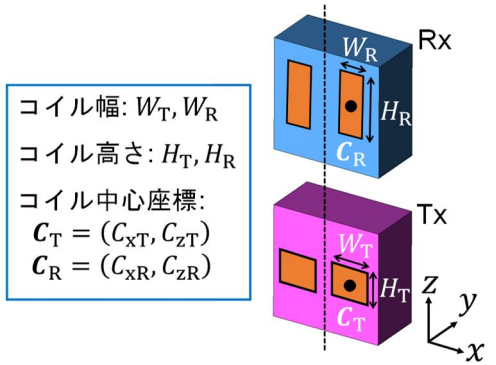


図2 コイル形状に対する寸法パラメータ

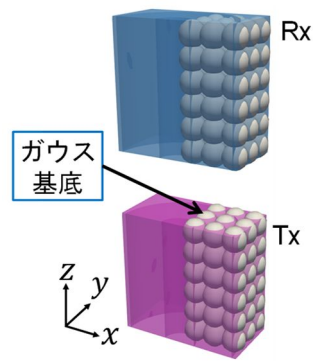


図3 磁気コアトポロジー最適化におけるガウス基底配置

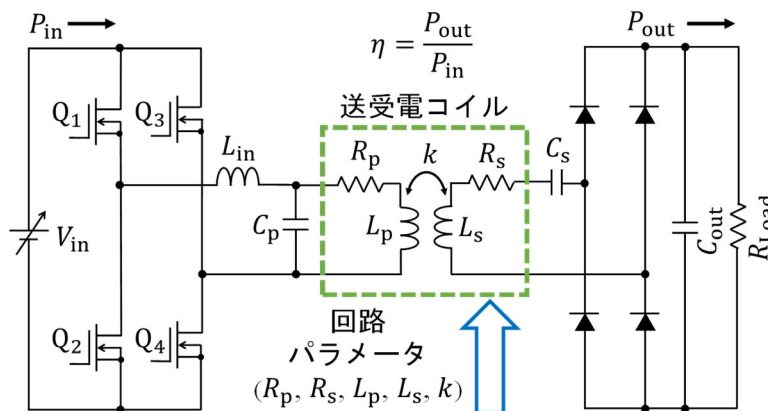


図4 ワイヤレス電力伝送装置の等価回路

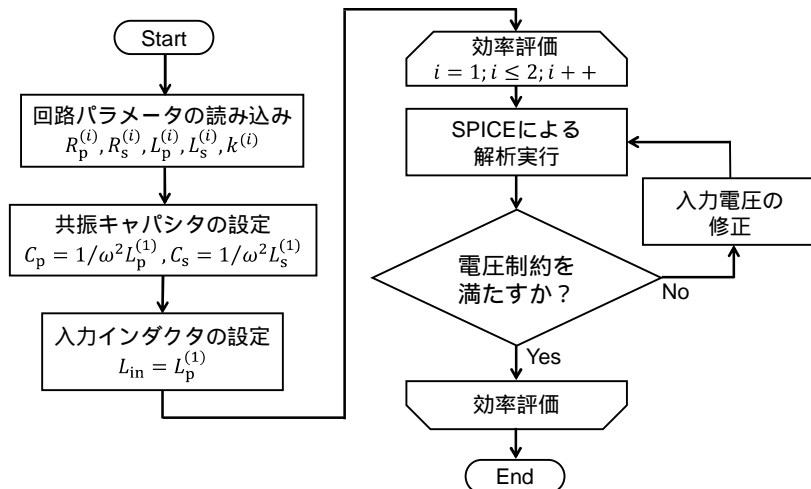


図5 回路効率の評価におけるフロー

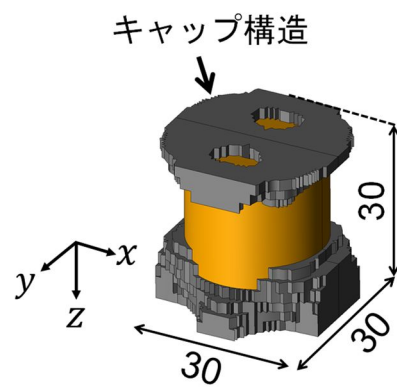
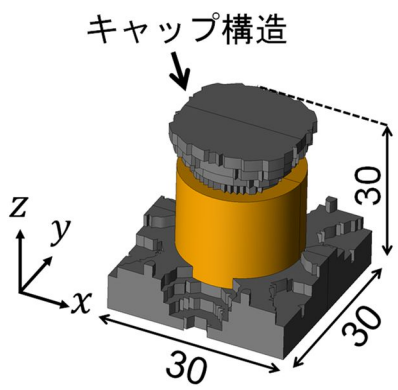
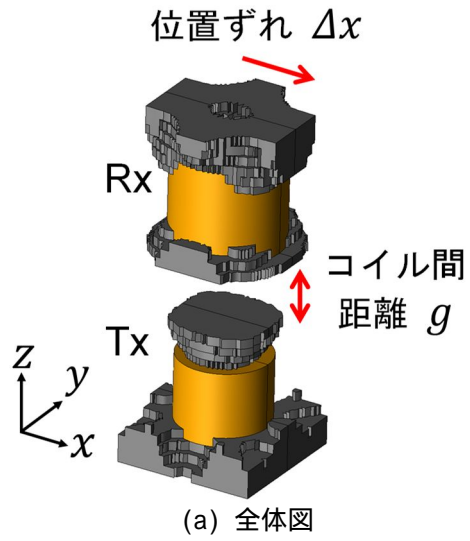
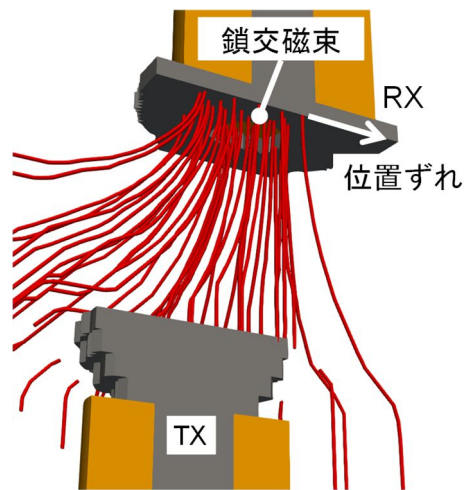


図6 送受電コイルの最適形状 (単位: mm)



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshitsugu Otomo, Kazuki Sato, Ken Onozaka, Hajime Igarashi	4. 巻 60
2. 論文標題 Parameter and Topology Optimizations for Wireless Power Transfer Device Considering Magnetic and Circuit Properties	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3301995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 大友佳嗣, 佐藤一樹	4. 巻 144
2. 論文標題 ワイヤレス給電装置の高効率化に向けた磁気回路と送受電回路の最適設計	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大友 佳嗣, 佐藤 一樹, 小野坂 健, 五十嵐 一
2. 発表標題 磁気・回路特性を考慮したワイヤレス電力伝送用送受電コイルのパラメータ・トポロジー最適化
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshitsugu Otomo, Kazuki Sato, Ken Onozaka, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Parameter and Topology Optimizations for Wireless Power Transfer Device Considering Magnetic and Circuit Properties
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Field (Compumag 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大友佳嗣, 佐藤一樹, 小野坂健
2. 発表標題 コイル銅損と磁気コア鉄損を考慮したワイヤレス電力伝送用コイルのパラメータ・トポロジー最適化
3. 学会等名 2023年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuli Yin, Kazuki Sato, Yuki Ito, Hiroaki Ota, Yoshitsugu Otomo, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Monte Carlo Tree Search Applied to Design of Wireless Power Transfer System
3. 学会等名 17th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大友佳嗣
2. 発表標題 電気電子機器の3次元トポロジー最適化と今後の展望
3. 学会等名 令和5年度電気・情報関係学会 北海道支部連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大友佳嗣
2. 発表標題 ワイヤレス給電装置の磁気回路とインバータ回路の最適設計
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁性体コア，コイル部品，及び非接触給電システム	発明者 佐藤一樹小野坂健三 島大地伊藤勇輝小田 博章五十嵐一大友佳	権利者 オムロン，北海 道大学，長崎大 学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-029669	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------