

審査の結果の要旨

氏名 武田 広大

本論文は、「非接触電力伝送システムの補償回路の体系的設計論-多様な電気自動車向け給電システム実用化を目指して-」と題し、磁界結合型非接触電力伝送技術の普及を促進するために、補償回路解析の専門的知識を十分に有さない設計者にも設計作業を可能とする補償回路の設計論を導くことを目的とし、以下の 7 章からなる。

第 1 章は「序論」として、非接触電力伝送技術、特に電気自動車への非接触給電技術の先行研究を概観し、それらの問題点を補償回路の解析・設計の観点からまとめている。そして、設計自由度を大きくするために、共振条件を満たさない回路の取り扱いが重要であることを指摘し、一般的な補償回路の設計方法を系統化する、という本論文の目的を明示している。

第 2 章では、「非接触給電における補償回路条件と設計の現状と課題」として、非接触電力伝送技術の現状と課題、特に補償回路設計の重要性を述べ、設計の難易度を、入出力制御および、共振条件の有無から整理している。そして、工業製品としての回路設計を行う際に考慮すべき、電源や送受電コイルの電流制約と互換性の課題を整理している。

第 3 章では、「非接触給電システムの送受電分割による電力伝送特性の可視化」として、非接触電力伝送回路を送電側と受電側に分割して解析する手法、及びその結果得られる、伝送可能な電力を、受電側二次側回路を送電側一次側から見た際の等価インピーダンスの複素平面上にマップする可視化法を提案している。この分割解析は、送電側と受電側の補償回路の電力伝送特性を個別に議論し、様々な組み合わせの補償回路を統一的に議論することを可能とする。さらに、分割解析結果を複素インピーダンス平面上に視覚的にマップすることで、実用的な制約条件を含めた補償回路が持つ電力伝送特性の推定を容易にする。この可視化マップにより、従来の共振条件を満たす場合と、共振条件を満たさない場合の双方の補償回路のもつ出力電力特性を、統一的かつ直感的に理解することが可能となった。

第 4 章では、「はしご型補償回路の電力伝送特性の幾何的特徴の解析と体系的理解」として、上記の可視化マップを設計に有効に利用するため、はしご型補償回路の電力伝送特性の幾何的特徴を解析し体系的に把握する具体例を記述した。理論的簡便さのために、負荷以外の抵抗が無視できると仮定し、その場合の、電力とインピーダンスの関係を論じ、円と直線の方程式を導出した。これにより、回路設計者が、複数の円を描くことで可視化マップを作図し、複雑な数値計算を用いず電力特性の概要を把握することが可能となる。

第 5 章では、実用的制約を考慮した補償回路設計論として、上記に示した送受電分割解析と幾何学的特徴を利用した実用的制約を満たす、定格電力給電可能な補償回路の系統的設計方法を記述している。ここでは実用的制約として、電源の電流電圧及び電流位相、送受電コイルの電流を扱っている。まず、これらの制約を指定された変数の変域で満たす補償回路を設計する。提案設計法では、送受電分割解析に基づき、まずは受電回路、次に送電回路の順で設計を行う。その際、幾何学的特徴を利用し、定格給電時に制約条件が充足されるか否かを速やかに判定できる。本設計法を用いた回路の数値計算から、電流制約と給電力率にトレードオフの関係があることも示された。次に、可視化マップを利用し、手動で補償回路の調整を行う方法を例示した。そして、電力動揺平準化のための補償回路設計として、送受電分割解析と幾何学的特徴に基づき結合係数変動に対する電力動揺を抑制する補償回路設計手順を記述した。結合変動が大きいときの電力設計を、幾何学問題として解釈し、煩雑な計算を回避し容易にした。共振条件を意図的に仮定せぬことで、先行研究で提案された手法に比べ、より良い電力平滑化を達成できることを示した。

第 6 章では、「SAEJ2954 に基づく EV 用静止中非接触給電システムの給電評価と互換性設計」として、実際の電気自動車 向け静止中給電の標準技術規格である SAE J2954 に着目して、提案設計法の適用例を示した。この国際規格では、仕様の異なるシステム間での給電評価が必要であり、送受電の回路には多くの組み合わせを想定する必要がある。そこで、提案した送受電分割解析と可視化の簡易性を有効活用し、給電評価の結果を包括的に示した。さらに、互換性のないシステム同士の回路に、提案可視化マップを利用した設計アルゴリズムを適用することで、給電互換性を確認し、担保することが可能となる。

第 7 章は、「結論」として、研究成果を総括し、今後の課題を提示している。

以上要するに、本論文は、非接触給電システムにおける、補償回路の果たす役割を統一的に整理し、電力伝達特性を等価二次インピーダンスの複素平面上に可視化し、それに基づく補償回路設計で、従来方式ごとに個別に検討されてきた各種補償回路の電力特性を統一的に扱い、共振条件が成立しない場合をも含む一般性のある補償回路設計法を導き、道路側電気設備と車両側電気用品の設計者が異なる、電気自動車の非接触電力伝送システムを例に、異なる回路間の互換性を考慮した補償回路の解析法・設計法を提示したことで、非接触電力伝送技術の今後の社会実装に資するもので、電気工学、特に、電力用半導体に基づく電力変換工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。