

論文の内容の要旨

論文題目 磁界共振結合ワイヤレス給電における 伝送電力制御に関する研究

(Study on Transmitting Power Control Method for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling)

氏名 郡司 大輔

磁界共振結合方式によるワイヤレス給電技術は数十 cm 程度の伝送距離において高い効率を実現できることから様々な分野での産業応用が期待されている。特に自動車分野では電気自動車への適用が期待されている。電気自動車は電気エネルギー源の多様性や走行時の環境負荷が低いことにとどまらず、モータの持つ高い応答性を活かした車両運動制御により走行の安全性、快適性を高めることができるため、より一層の普及が望まれる。しかし、内燃機関を用いた従来の自動車に比べて一充電走行距離が短いことや、充電操作の煩雑さが普及の阻害要因となっている。ワイヤレス給電による電気自動車への走行中給電、停車中給電はこれらの課題を根本的に解決する有力な手段である。車両運動制御の観点においては各車輪の独立制御が可能でありドライブシャフトが存在しないため高い制御性能を実現できるインホイールモータの実用化が期待されている。しかし、インホイールモータの電力線、信号線に起因する信頼性・安全性の課題が存在する。電力線をワイヤレス給電技術によりなくすことでインホイールモータの実用化の可能性を大きく高めることができる。本論文ではワイヤレス給電における電力変換回路の構成と伝送電力制御に着目する。ワイヤレス給電においては負荷の特性、使用条件において想定されるコイル間の結合状態の変動などに応じて電力変換回路を適切に構成し、伝送電力制御を行なう必要がある。先行研究では定電圧負荷において二次側に設けたDC-DCコンバータによる伝送効率の最大化や負荷電流制御手法が提案されているが、定電力負荷での伝送電力制御手法や、二次側整流回路にAC-DCコンバータを用いる優位性とその制御手法に関しては明らかでなかった。

本論文は磁界共振結合によるワイヤレス給電における電力変換回路の構成と伝送電力制御手法を体系化することを目的とする。本論文は大きく分けてワイヤレス電力伝送の過渡応答特性の解析とそのモデル化、定電圧負荷における伝送電力制御、定電力負荷における伝送電力制御、以上3つの要素から構成されている。

本論文の内容と構成と以下に示す。

第1章ではワイヤレス給電における電力変換回路の制御に関する先行研究を振り返り、本研究の位置付けを行なった。先行研究では伝送効率の最適化といった個々の制御目的に応じた電力変換回路構成を採用しており、電力変換回路の構成を一般化して所望の制御目的との対応を体系化した研究は見受けられない。本研究では二次側の電力変換回路を一般化して記述することで、動作条件や制御目的に応じた電力変換回路の操作範囲を定式化し、体系的に表すことを目的とした。

第2章ではワイヤレス給電の自動車応用について説明した。電気自動車のバッテリーの走行中・停車中給電は定電圧負荷の典型的な例であり、想定されるシステム構成について述べた。また、定電力負荷を有する例としてワイヤレスインホイールモータについて説明した。電気自動車における車両運動制御においては、各輪独立駆動が可能であり、ドライブシャフト剛性による制御帯域の低下がない

ことから、インホイールモータ方式が有利である。しかし、電力や信号を供給する配線が走行時に繰り返し屈曲を受けるうえ、配線が外界に露出しているため安全性、信頼性の課題が存在する。そこで、これらの課題を解決するワイヤレスインホイールモータを提案し、これを実現するための技術課題について説明した。

第3章では共振コンデンサを一次側・二次側ともにコイルと直列に挿入する直列-直列方式のワイヤレス給電回路における過渡応答特性について解析した。ワイヤレスインホイールモータのように負荷電力の変化が速いシステムや、走行中給電のように結合係数が大幅に変動するシステムにおいては過渡特性の把握が重要である。等価回路から伝達関数を導出し、パラメータ変化と過渡特性について検討した。導出した伝達関数は共振周波数成分を含んだものであるが、電力伝送においては共振周波数成分を含む瞬時値ではなくその包絡線の把握がより重要である。そこで、伝達関数の支配極に着目し包絡線応答を表す近似モデルを導出した。

第4章では二次側の電力変換回路構成の一般化を提案した。二次側整流回路としてはダイオードブリッジ回路とフルブリッジコンバータの2種類が考えられる。また、その後段のDC-DCコンバータの有無により合計4通りの構成が存在する。これらをそれぞれ制御可能なAC-DC変換回路とDC-DC変換回路を接続した構成として一般化して各々の変換比を定義し、等価負荷抵抗の操作可能な範囲をもとに各回路構成を比較した。また、AC-DC変換回路のスイッチング動作方式として同期整流方式と2モード方式について説明した。同期整流方式は二次側電流と同期してスイッチングする方法であり duty 比が変換比に対応する。2モード方式は二次側電流が電流源とみなせることを利用し、二次側回路をショートさせる時間を持たせることで平均的な変換比を操作する方法である。

第5章ではバッテリーへの給電に代表される定電圧負荷について取り上げた。磁界共振結合方式がバンドパスフィルタ特性を有することに着目し、二次側電力変換回路の入力電圧を基本波成分の正弦波電圧源と近似することで二次側電流の近似式を導出した。さらに、任意の負荷電流制御や最大効率制御など所望の制御目的に対して、第4章で提案した一般化回路構成における電力変換回路の変換比の動作点を定める計算式を導出した。これにより、第4章での提案と合わせて所望の制御を実現するために適した電力変換回路の構成を容易に選択することができる。

先行研究では抵抗負荷、定電圧負荷について取り扱われているものがほとんどであり、ワイヤレス給電における定電力負荷の挙動やその制御については明らかでなかった。そこで、第6章ではワイヤレスインホイールモータのような定電力負荷について負荷電圧の安定性を解析し、不安定なシステムであることを明らかにした。負荷電圧のフィードバック制御は通信の遅延や途絶による影響を避けるため二次側回路内で完結することが望ましい。そこで本研究では二次側コンバータによる負荷電圧制御手法を提案し、負荷変動や結合係数変動が生じた場合においても定電力負荷への安定した電力伝送を実現した。

第6章で提案した制御法では一次側電圧の制御をフィードフォワード制御としたため、あらかじめ設定したマージンを超えて負荷や結合係数の変動が生じた場合、伝送電力が不足し二次側での制御が実現できなくなるという課題が存在する。そこで、第7章では二次側コンバータが2モード方式である場合において、二次側コンバータの動作状態を一次側電流の変化により推定可能であることに着目し、一次側電流により二次側コンバータの変換比を推定する手法を提案した。推定した二次側変換比をフィードバック制御で所望の目標値に制御することで伝送電力の余裕を確保し、負荷や結合状態の変動に対して伝送電力の不足が生じない制御手法を実現した。提案手法は一次側・二次側間で情報通信を用いないため、通信遅延等による影響を受けず、機器構成の簡略化も実現できる。

第8章ではワイヤレス電力伝送における電力変換回路の構成と制御の体系化について振り返り、本論文のまとめとした。