

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06061

研究課題名(和文) 電界結合と磁界結合を考慮した結合共振型無線電力伝送理論の体系化

研究課題名(英文) Systemization of unified theory of wireless power transfer considering electric-field and magnetic-field coupling

研究代表者

平山 裕 (Hirayama, Hiroshi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70372539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：無線電力伝送技術のための新しい理論体系が求められている。パワーエレクトロニクスの理論体系では、分布定数としての取り扱いが必要な周波数での取り扱いに限界がある。マイクロ波技術やアンテナ技術の理論体系では、負荷のインピーダンスが負荷の都合で変わることや、負荷は定電圧を要求しているというWPTの特徴に対応することが困難である。本研究は高周波で大電力を伝送することに特化した、パワーエレクトロニクス技術によるWPTとマイクロ波技術によるWPTを統一的に説明する理論の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線電力伝送の実用化が期待されているが、さらなる伝送効率・伝送距離の向上が必要である。現在、無線電力伝送技術は、パワーエレクトロニクス技術に基づくものと、マイクロ波技術に基づく物に大別される。それぞれの技術に基づいたWPTシステムが提案されているが、実用化のためには両者を融合することにより、より高効率で長距離を伝送可能なWPTシステムの開発が必要である。本研究は、従来は全く独立した体系を持つパワーエレクトロニクス理論によるWPTとマイクロ波技術によるWPTを統一的に説明できる理論を構築することにより、より一層の両者の融合の促進が期待される。

研究成果の概要(英文)：Novel theory for wireless power transfer (WPT) which consistently explains power-electronics based WPT system and microwave-technology based WPT system is established.

Power electronics theory for WPT has a limitation of treating distributed circuit. It's difficult for microwave theory to adopt WPT system because load impedance varies due to a demand of user, or load requires constant voltage. The proposed unified theory can treat these systems, which enables us to combine power-electronics technology and microwave technology for WPT.

研究分野：無線電力伝送、アンテナ工学、マイクロ波工学

キーワード：無線電力伝送 結合共振 アンテナ マイクロ波 パワーエレクトロニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無線通信技術の発達により通信線はどんどん無線化されており、現在、電力線が無線化されない最後の線となっている。残る電力線を無線化する需要が高まっている。また、電気自動車の普及が始まっているが、充電するためのケーブルの接続の煩雑さが問題となっている。電気自動車はスマートグリッドにおける蓄電装置とも位置づけられており、自動車用の無線電力伝送装置の実用化が期待されている。

従来から電磁誘導が無線給電のために用いられていたが、伝送距離が限られているという問題があった。また、マイクロ波送電は宇宙太陽光発電の分野で研究が進められてきたが、民生用に用いるには指向性制御の問題がある。

2. 研究の目的

2007年にマサチューセッツ工科大学により提案された結合共振型無線電力伝送は、電気自動車や家電製品への応用を目的として活発な研究が行われているが、その多くは電磁界シミュレータを用いた最適化に頼っているのが現状である。本研究は、結合共振型無線電力伝送の本質的な原理を、アンテナ工学、マイクロ波工学、電力工学の観点から明らかにした上で、それらの観点を包含する、総括的な理論体系を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

結合共振型無線電力伝送の電界結合と磁界結合の両方を考慮した等価回路表現により、電力伝送メカニズムの明確化を行った。電磁界シミュレーターにより、磁界による結合を主とするLC共振型WPTシステム、電界と磁界の両方の寄与が無視できない自己共振型WPTシステムの伝送特性を計算し、等価回路の妥当性を検討した。

4. 研究成果

結合共振型無線電力伝送は、パワーエレクトロニクスとマイクロ波工学という、全く異なる学問体系の境界に属する技術である。主にkHz帯を用いた無線電力伝送技術は、トランスの1次側と2次側に空隙を設けたものとして捉えられ、パワーエレクトロニクス技術が適用されている。また、MHz帯を用いた無線電力伝送技術は、アンテナを近傍界領域で結合させたもの、もしくはマイクロ波共振器の応用技術としてマイクロ波技術が適用されている。しかしながら、パワーエレクトロニクスでは、分布定数回路や電界と磁界の相互作用の影響を扱えないという問題がある。マイクロ波工学は、通信のために波形を正確に伝送することを主目的としているため、電力効率が最重要となる電力伝送の目的には適していないという問題がある。

この研究では、パワーエレクトロニクスとマイクロ波工学を包含する、新しい無線電力伝送の理論モデルを構築した(図1)。この結果、従来は、パワーエレクトロニクスに基づく無線電力伝送とマイクロ波工学に基づく無線電力伝送の関係が明らかになり、相互の技術の融合が容易となった。

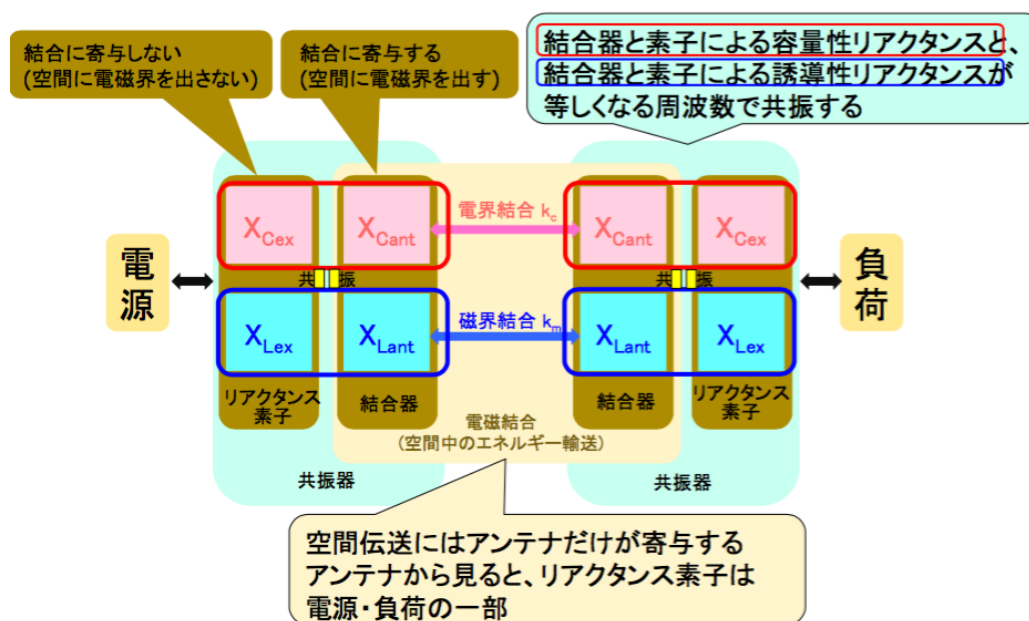


図1: 共振を利用した無線電力伝送の統一モデル: パワーエレクトロニクス技術でよく用いられる、「結合コイルと共振コンデンサ」を用いた方式と、マイクロ波技術でよく用いられる「自己共振アンテナ」を用いた方式を、統合的に説明できる。また、「電界結合」と「磁界結合」による電磁結合と共振の観点からも、共役インピーダンス整合による観点からも統合的に説明できる。

しかしながら、この理論には2点の問題点が残っていた。1点目は、「共振型」ではない無線電力伝送方式には適用できない点である。平行2本線路を用いた走行中給電などの場合、送電側が単純な伝送線路構造となり、共振のメカニズムでは説明がつかなくなる。2点目は、このモデルでは高周波電源や整流回路を含めたシステムについて説明できないという問題である。特にパワーエレクトロニクス技術を用いた場合、結合用コイルをインバーター回路の一部として用いる。このような場合、高周波電源を含めたモデル化が必要となる。また、特にマイクロ波技術の場合、整流回路において高調波処理を行うことにより RF-DC 変換効率を向上させることがある。このような場合、整流回路を含めたモデル化が必要となる。

これらの問題を解決するために、DC 電源から DC 負荷までの WPT システム全体のモデル化を行った。このモデルを図2に示す。まず、無線電力伝送システムとは (1) 周波数変換 (2) インピーダンス実部変換 (3) インピーダンス虚部変換 (4) 電磁界モード変換 の4つの機能を持つことを明確にした。その上で、それぞれの要素技術がこの機能の実現にどのように関わっているかを明らかにした。

とりわけ、無線電力伝送システムにおいて電磁界を発生させるデバイスは最重要なデバイスであるにも関わらず、その名称や定義は明確でなく、パワーエレクトロニクス分野と高周波分野をまたいだ議論を行うときの問題となっていた。たとえば、「コイル」という名称は、高周波の分野で扱う「アンテナ」には適用できない。「共振器」という名称は、例えばコイルとコンデンサによって構成された回路について、コイルとコンデンサの組み合わせを「共振器」と呼ぶのか、電磁界を発生させるデバイスであるコイルだけを「共振器」と呼ぶのか、同一の文献の中でも混同して用いられている状態であった。申請者は、電磁界を発生させるためのデバイスを「結合器」として位置づけ、その役割について体系的な理論を構築してきた。

このモデルにより、例えばパワーエレクトロニクスによる力率最大化の考え方、マイクロ波による反射係数最小化の考え方を統一的に説明でき、また、パワーエレクトロニクスによる「トランスの k 値・ Q 値」とマイクロ波による「共振器の k 値・ Q 値」との違いを明確に説明することができる。

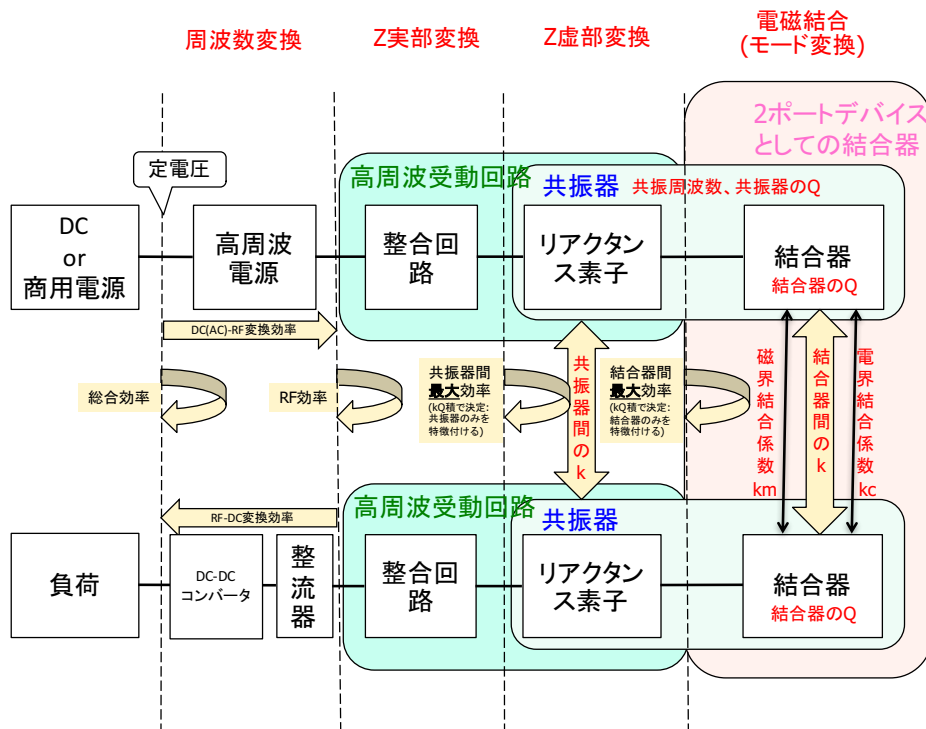


図2: 無線電力伝送システムの統一モデル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

[1] Han-Joon Kim, Hiroshi Hirayama, Sanghoek Kim, Ki Jin Han, Rui Zhang, Ji-Woong Choi, "Review of Near-Field Wireless Power and Communication for Biomedical Applications," IEEE Access, Vol. 5, pp. 21264 - 21285, Sept. 2017. (査読あり)

[2] 平山裕, 菊間信良, "電磁界から見た結合共振型無線電力伝送," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No. 9, pp. 868-877, 2015年9月 (査読あり)

[学会発表] (計32件)

[1] Hiroshi Hirayama, Masanori Ando, Toshihito Sonobe, "Suppression of Common-mode Radiation Using Folded-spiral Antenna for Wireless Power Transfer," Proc. of APEMC 2017,

pp. 86, June 2017.

[2] Hiroshi Hirayama, "Unified Coupling and Resonant Model for Near-field Wireless Power Transfer System," Proc. of ICCEM2017, 2B1.2, pp. 122-123, Mar. 2017.

〔図書〕 (計2件)

[1] Naoki Shinohara (編集) (担当：共著), Wireless Power Transfer: Theory, technology, and applications, IET 2018年08月 ISBN: 978-1785613463

[2] 篠原真毅 (監修)、平山裕、他 (担当：共著), ワイヤレス電力伝送技術の研究開発と実用化の最前線, シーエムシー出版 2016年08月 ISBN: 978-4-7813-1175-3