

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560453

研究課題名(和文) 結合共振型無線電力伝送の電力伝送メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of mechanism of coupled-resonant wireless power transfer

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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：ワイヤレス技術の進歩によって、電子機器への給電線を無線化する、無線電力伝送への期待が高まっている。この技術は高周波で電力を送るため、高周波を扱う通信工学と電力を扱うパワーエレクトロニクス工学の境界領域となっている。実用化のためにはそれぞれの技術を融合させた新しい理論体系が必要となる。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、パワーエレクトロニクス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、包括的な理論体系を構築した。

研究成果の概要(英文)：Coupled resonant wireless power transfer (CR-WPT) technologies are expected to release wires from electrical equipment. Since CR-WPT technology utilizes high-frequency electrical power, integration of radio-frequency(RF) engineering and power-electronics engineering. In this research, mechanism of WPT technology was elucidated from both RF and power-electronics engineering by building theoretical model of CR-WPT.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：無線電力伝送 結合共振 アンテナ

1. 研究開始当初の背景

ワイヤレス技術の進歩によって、電子機器への給電線を無線化する、無線電力伝送への期待が高まっている。この技術は高周波で電力を送るため、高周波を扱う通信工学と電力を扱うパワーエレクトロニクス工学の境界領域となっている。実用化のためにはそれぞれの技術を融合させた新しい理論体系が必要となる。

研究開始当初、無線電力伝送の技術開発は、パワーエレクトロニクス技術を基盤にしたものと、マイクロ波・アンテナ技術を基盤にしたものが存在した。パワーエレクトロニクス技術を基盤にしたものは、集中定数素子としてのコイルを用い、キャパシタを用いて力率整合を行うのに対し、マイクロ波・アンテナ技術を基盤にしたものは、分布定数素子として動作するアンテナに複素共役整合を行うなど、全く異なる学問体系に基づいていたため、その関係が明らかではなかった。そのため、両方の方式を同一のモデルで説明し、技術の融合を図り、より高効率で高性能な無線電力伝送システムの開発を促進することが期待されていた。

2. 研究の目的

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、パワーエレクトロニクス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、包括的な理論体系を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、パワーエレクトロニクス技術による無線電力伝送と、マイクロ波・アンテナ技術による無線電力伝送を、電力の空間伝送の部分と回路の部分に分離し、空間伝送部分の特性について電磁界解析を用いてモデル化した。その上で、等価回路モデルを構築し、電界結合による空間伝送部分と磁界結合による空間伝送部分、さらに共振現象を用いて伝送効率を最大化するためのリアクタンス素子に分割して、両方の技術体系を包含する理論モデルの構築を行った。

4. 研究成果

4.1 結合共振型無線電力伝送モデル

結合共振型に属するWPTシステムは、電界型・磁界型、直接給電型・間接給電型、集中定数型・分布定数型、自己共振型・LC共振型など様々な観点から分類できる。図1の様なモデルを導入することにより、あらゆる種類の結合共振型WPTシステムを統一的に説明できる。

まず、無線電力伝送機構を、電流・電圧によるエネルギーと電磁界のエネルギーを変換する「アンテナ」と、空間には電磁界を放出しない「リアクタンス素子」に分ける。アンテナは、電気的エネルギーと磁氣的エネル

ギーを電圧・電流に変換し、それらに対応する、容量性リアクタンス X_C と誘導性リアクタンス X_L を有する。これらはアンテナ自体を特徴づける量であり、伝送距離には依存しない。送信アンテナと受信アンテナは、伝送距離に依存する量である電界結合係数 k_C と磁界結合係数 k_L によって結合し、電力を伝送することができる。

共振とは、系の持つ電気的エネルギーと磁氣的エネルギーが等しくなる状態であるといえる。アンテナの持つ X_{Cant} と X_{Lant} およびリアクタンス素子の持つ X_{Cex} と X_{Lex} によって、送信側・受信側の共振器が構成され、共振周波数が決定する。

このモデルを用いることにより、いくつかの代表的な結合共振型無線電力伝送機構の動作を説明する。

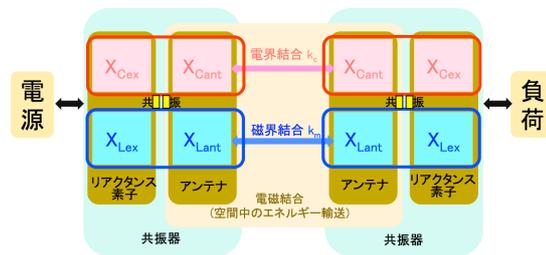


図1 一般化した結合共振型無線電力伝送モデル

4.2 自己共振型WPTの動作

MITによる結合共振型無線電力伝送のデモンストレーションでは、開放型ヘリカルコイルが用いられた。単体の開放型ヘリカルアンテナは、電流による微小ループと、電荷による微小ダイポールに分解できる。微小ループは誘導性リアクタンス、微小ダイポールは容量性リアクタンスを持っているため、この2つが等しくなる周波数において、共振が発生し、インピーダンスの虚部が0となる。2個の開放型ヘリカルアンテナが結合した場合は、図2に示すように、微小ループ同士が磁界結合、微小ダイポール同士が電界結合することとなる。

このことを、図1に示すモデルを使って説明すると、図3のようになる。アンテナ自身が誘導性と容量性リアクタンスを持っているため、リアクタンス素子を用いなくても共振が起こる。この結果、電界結合と磁界結合の両方が存在することになる。電界結合と磁界結合が共存することの影響として、巻き方を逆にすることにより結合係数が変化するという現象が現れる。

なお、単にヘリカルアンテナを結合させただけでは、インピーダンスの虚部の整合しか行われなため、実部を整合させるための方法は別に必要である。MITのデモンストレーションでは、ループによる間接給電構造とし、ループとヘリカルの間隔を調整することにより、実部の整合を行っている。

等価回路の観点で考えると、自己共振型であっても、トランスで表現することができる。しかしながら、等価回路は、ポートから見た振る舞いを表現することが目的である。等価回路がトランスで表現できることと、磁界結合のみが存在する(電界結合が存在しない)ことは、必ずしも等価ではないことは注意が必要である。

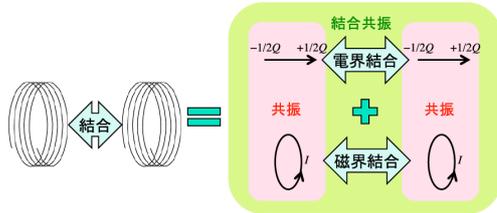


図2 結合したヘリカル共振器

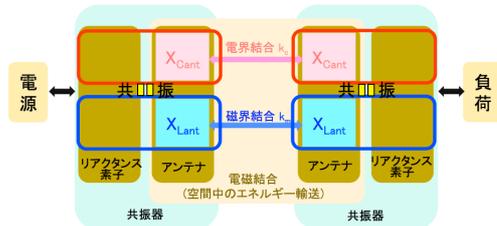


図3 結合共振型無線電力伝送モデルによる、自己共振型の説明

4. 3 電界型 WPT の動作

微小ダイポールアンテナに、共役整合インピーダンスに基づく複素共役整合を行う整合回路を接続した場合のシステムモデルは図4の様になる。アンテナ端子間のSパラメータさえ測定すれば、共振という概念を用いずに設計を行うことが可能である。これを結合共振モデルで説明したものは図5となる。微小ダイポールアンテナは電気ダイポールとみなせるので、電界結合のみが存在する。微小ダイポールアンテナの入力インピーダンスは容量性なので、共振のためには外部にリアクタンス素子が必要である。インピーダンス整合の観点で設計した場合、アンテナと整合回路をまとめて一つの共振器と見なすと、アンテナと整合回路のリアクタンス成分により共振していることになる。即ち、整合回路が、インピーダンス虚部を0にして共振を起こす作用と、実部の整合を行い受電電力を最大化する作用を持っていることになる。

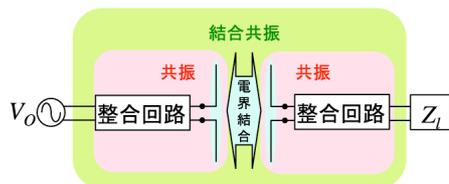


図4 微小ダイポールによる電界結合を用いた結合共振型無線電力伝送

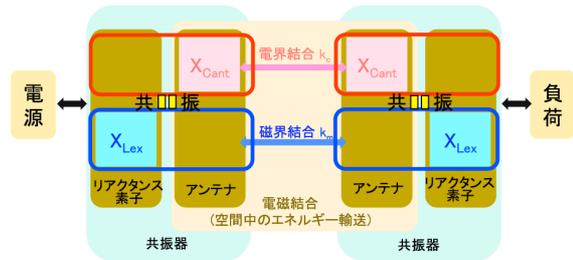


図5 結合共振型無線電力伝送モデルによる、電界結合型の説明

4. 4 磁界型 WPT の動作

送受電コイル間の結合をトランスとみなし、力率補償のキャパシタを接続し、さらに受電電力を最大化するための最適負荷を接続した場合のシステムモデルは図6の様になる。この場合も、図7に示すように、送受電コイルは誘導性リアクタンスのみを持つため、力率補償キャパシタの接続により共振器を構成しているものとみなすことができる。

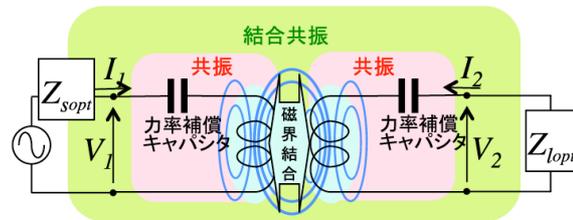


図6 電磁誘導を用いた結合共振型無線電力伝送

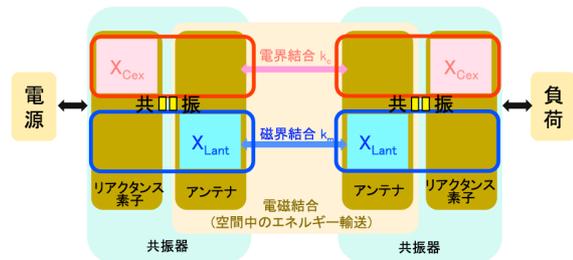


図7 結合共振型無線電力伝送モデルによる、電磁誘導型の説明

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①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, Vol. J98-B, No. 9, Sep. 2015. (Printing)

②矢満田博之、平山裕、菊間信良、榊原久二 男

結合共振型無線電力伝送用アレーアンテナ

を用いた金属異物検出システムの検討
電子情報通信学会 論文誌 ,
Vol. J98-B, No. 8, Aug. 2015. (Printing)

③ H. Hirayama, T. Amano, N. Kikuma, K. Sakakibara, "An Investigation on Self-resonant and Capacitor-loaded Helical Antennas for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," IEICE Trans. on Commun., Vol. E96-B, No. 10, pp. 2431-2439, Oct. 2013

[学会発表] (計 15 件)

① H. Hirayama, S. Fukasawa, K. Nakamura, N. Kikuma and K. Sakakibara, "Wireless Power Transfer Using Self-resonant Spiral Antenna Through Reinforced Plasterboard Wall," Proc. of EuCAP2015, A3-29, 2015 年 4 月 15 日、リスボン (スペイン)

② Hiroshi Hirayama, Shohei Fukasawa, Hiroyuki Yamada, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "EMC Characteristics of Open-end and Short-end Helical Antennas for Coupled-Resonant Wireless Power Transfer," Proc of EMC Europe 2014, OS1-1, 2014 年 9 月 2 日、ヨーテボリ (スウェーデン)

③ H. Hirayama, H. Yamada, N. Kikuma, K. Sakakibara, "Undesired Emission from Coupled-Resonant Wireless Power Transfer Antenna for Fundamental and Harmonics Frequency," Proc. of EMC' 14 Tokyo, pp. 438-441, 2014 年 5 月 15 日、一ツ橋ホール (東京都千代田区)

④ H. Hirayama, K. Komatsu, H. Yamada, N. Kikuma, K. Sakakibara, "Dielectric Loading Effect of Spiral Tape Antenna for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," Proc. of EuCAP 2014, pp. 2426-2427, 2014 年 4 月 9 日、ハーグ (オランダ)

⑤ K. Komatsu, H. Yamada, H. Hirayama N. Kikuma, K. Sakakibara, "Dielectric Loading Effect of Open-end Spiral Antenna for Wireless Power Transfer," Proc. of VJISAP, 2014 年 1 月 8 日、ハノイ (ベトナム).

⑥ K. Komatsu, H. Hirayama N. Kikuma, K. Sakakibara, "Far-field Radiation and Near-field Leakage of Self-resonant Spiral Antennas for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," Proc. of EMC Europe 2013, pp. 883-886, 2013 年 9 月 13 日、ブルージュ (ベルギー)

⑦ H. Yamada, H. Hirayama N. Kikuma, K. Sakakibara, "Obstacle Detection Method Using Array Antenna for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," Proc. of PIERS 2013 Stockholm, 4A4-10, pp. 1548-1551,

2013 年 8 月 15 日、ストックホルム (スウェーデン)

⑧ H. Hirayama, T. Amano, N. Kikuma, K. Sakakibara, "Undesired Emission and Biological Effect of Open-end and Short-end Antennas for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," Proc. of APEMC 2013, TC14-5, 2013 年 5 月 21 日、メルボルン (オーストラリア)

⑨ K. Miwa, H. Mori, N. Kikuma, H. Hirayama, K. Sakakibara, "A Consideration of Efficiency Improvement of Transmitting Coil Array in Wireless Power Transfer with Magnetically Coupled Resonance," Proc. of WPTC 2013, pp. 13-16, 2013 年 5 月 15 日、ペルージャ (イタリア)

⑩ H. Hirayama, Tomohiro Amano, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "A Consideration of Grounded Helical Antenna for Coupled-resonant Wireless Power Transfer," Proc. of PIERS 2013 Taipei, 1P5b-2, 2013 年 3 月 25 日、台北 (台湾)

⑪ Tomohiro Amano, Hiroshi Hirayama, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "A consideration of helical antennas for coupled resonant wireless power transfer using equivalent circuit," proc. of ISAP 2012, pp. 435-438, 2012 年 10 月 31 日、名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)

⑫ Kanako Komatsu, Hiroshi Hirayama, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "A consideration of electric and magnetic coupling coefficient of spiral antenna for wireless power transfer," proc. of ISAP 2012, pp. 170-173, 2012 年 10 月 30 日、名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)

⑬ Hiroshi Hirayama, Kanako Komatsu, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "Undesired Emission from Spiral Resonators For Coupled Resonant Wireless Power Transfer," Proc. of PIERS 2012, 2012 年 8 月 21 日、モスクワ (ロシア)

⑭ Hiroshi Hirayama, Kanako Komatsu, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "On a coupling coefficient of spiral antenna for coupled-resonant wireless power transfer," Proc. of EuroEM2012, 2012 年 7 月 3 日、トゥールーズ (フランス)

⑮ Hiroshi Hirayama, Yuki Okuyama, Taiki Shinhashi, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "Estimation of Transmission Characteristics for Coupled Resonant Wireless Power Transfer in the kHz Range," Proc. of IWPT2012, 2012 年 5 月 11 日、龍谷大学響都ホール校友会館 (京都府京都市)

〔図書〕（計1件）

①平山裕 他、科学技術出版、電界磁界結合型ワイヤレス給電技術-電磁誘導・共鳴送電の理論と応用-、2015, 91-102

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平山 裕 (Hirayama Hiroshi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70372539