

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656190

研究課題名（和文）

パワーエレクトロニクスによる電磁共鳴型ワイヤレス電力伝送の制御技術に関する研究

研究課題名（英文）

Study on Control Technique of Power Electronics System for Wireless Power Transfer via Electromagnetic Resonance Coupling

研究代表者

居村 岳広（IMURA TAKEHIRO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：30596193

研究成果の概要（和文）：

電磁共鳴方式のワイヤレス電力伝送は、負荷変動が激しく、素早い制御が望まれている。従来のコンデンサを機械的に切り替える方式ではスピードに限界があり、素早い制御を可能とするパワーエレクトロニクスと磁界共鳴技術の融合が必要とされていた。本研究では、（1）パワエレによるインピーダンスマッチングとして、インピーダンス変動による効率低下を防ぐために、パワエレによる素早い制御技術の確立を行ない（2）推定技術として、負荷変動が生じたことを把握する技術の確立を行ない（3）複数負荷への電力配分として、負荷の数が増減した際にも任意の配分で電力が送れる技術の確立を行った。

研究成果の概要（英文）：

Electromagnetic resonance coupling is a new wireless power transfer technology. This technology is highly dependent on load values and fast control technique is required. Typically, control is implemented by switching condensers with different values. However the mechanical switches used have slow response. Therefore, a fast control of power electronics circuit for impedance matching is needed. The method combines power electronics and magnetic resonance coupling. The establishments of three areas are proposed in this research. (1) Impedance matching using power electronics circuit: in this study, fast control technique with power electronics is used to prevent efficiency drop due to load value change. (2) Estimation method: estimating the load values from transmitting side. (3) Power division: controllable power division regardless of the number of receiver.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ワイヤレス電力伝送，インピーダンスマッチング，パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

電磁共鳴方式のワイヤレス給電は大きなエアギャップと高効率を達成できる新しいワイヤレス電力伝送技術である。この2007年に発見された電磁共鳴は当初は物理学者主導で理論が展開されていたため、振動現象一般に使われるモード結合理論を使用して説明されていた。それを申請者は、アンテナ理論、等価回路化まで落としこむ事に成功した。一方で、ダイナミックに変化するインピーダンスの制御にはパワーエレクトロニクス（以後、パワエレ）こそが最適である事は明白である。しかしながら、パワエレ技術を電磁共鳴技術と融合させる研究はいまだかつて行なわれていない。従来のインピーダンスマッチングによる最大効率実現は、準静的な環境では非常に適しているが、実際のワイヤレス電力伝送の用途を想定すると動的な状況下において使用されるケースが多い事が分かる。そのため、急激なインピーダンス変化に対応する新たな構想が必要となる。学会においては、電磁共鳴によるワイヤレス電力伝送の最大効率化方法として、インピーダンスマッチング方式がやっと認知され始めたばかりであるが、更に一步進んだ、パワエレ技術による、最大効率化技術が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、『パワーエレクトロニクスによる電磁共鳴型ワイヤレス電力伝送の制御技術に関する研究』と題し、アンテナ理論先導型の電磁共鳴技術に対し、パワーエレクトロニクスの適応という新しいアプローチを行い、新しい学術分野を創造することが目的である。

波長の長さが無視できない分布定数的に動作する電磁共鳴技術に、パワーエレクトロニクス技術を持ち込むという非常にチャレンジングなテーマであるが、萌芽研究という目的や規模に非常に合致している。本技術が完成すると、インピーダンスマッチングをパワーエレクトロニクス技術で行なう事が可能になり、制御を素早く行うことや、機器の小型化、電源の高効率化などができるため、パワーエレクトロニクスが電磁共鳴方式のワイヤレス電力伝送のコア技術となると同時に、パワーエレクトロニクスの業界・分野に新しい道を指し示す事が出来る。

3. 研究の方法

従来の13.56MHzより低いkHz帯の周波数で動作する磁界共鳴用コイルを作成した上で、負荷変動が生じる現実のアプリケーションを想定して、3つの理論の確立を行い、実証実験を行なう。

(1) パワエレによるインピーダンスマッチング

負荷単独のインピーダンス変動による効率低下を防ぐために、パワエレによる素早い制御補償を行なう。

(2) 推定技術

負荷変動が生じたことを把握するため推定技術の確立を行なう。

(3) 複数負荷への電力配分

負荷の数が増減した際にも任意の配分で電力が送れる技術の確立を行なう。

4. 研究成果

(1) パワエレによるインピーダンスマッチング

本テーマのコアとなる技術である。負荷の変動が生じた際に、もしくはエアギャップが変わった際に、リアルタイムで変動を補償する。従来は、バリコンをモーターで駆動したり、多数のコンデンサとコイルの組み合わせをリレーで切り替えたりしてインピーダンスマッチングを行なっていたが、機械的な動作が必要であり、その分の遅延は回避できなかった。今回、パワエレの回路として、昇降圧チョッパ（図1）を負荷側に入れ、デューティ比を変えることでインピーダンスを素早く制御させるというパワエレによるインピーダンスマッチング技術を実現させた。提案の方式は、解析結果と実験結果もほぼ一致した。また、負荷としては、可変型の抵抗負荷だけでなく、インピーダンス変化の激しい電気二重層キャパシタでも実験を行ない、問題なく充電できることを示した。電気二重層キャパシタへの充電に関しては、磁界共鳴型回路がイミタンス特性を有し、理想状態では、定電圧駆動をすると定電流充電になるため、磁界共鳴型との相性が良いという特性も明らかになった。

また、一般的なアプリケーションにおいて負荷は定電力負荷となるが、電源を定電圧源として定電力負荷に給電を行った場合、ワイヤレス電力伝送においては、電圧増幅率が

きいので、負荷側電圧が発振し不安定となる現象が想定されていた。まず、その現象を実験によって確認し、対策として昇降圧チョップによってインピーダンスを調整する事によって、負荷側電圧を安定させることに成功した。更に、電源を定電圧源ではなく定電流源とすることで、ある条件下（電源側アンテナの損失がない場合）負荷側電圧を負荷抵抗値にかかわらず一定となり、安定となることを式で表した。このことから、電源電流を制御することによって負荷側電圧をコントロールし、定電力負荷に最大の効率で電力伝送ができるという方向性が示された。

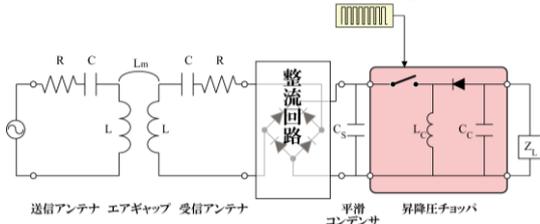


図 1 昇降圧チョップを利用したインピーダンスマッチング回路

(2) 推定技術

実際の利用シーンを想定して、2次側の情報を推定する技術の確立を行なった。2次側の負荷が定電力駆動する場合、2次側に必要な電力が供給されているかなどの情報を1次側で把握し、適切な電力を供給する必要がある。つまり、若干の電圧の調整が必要になるが、現状では、2次側から1次側への情報の伝達は電力伝送とは別システムの通信用無線を使うことになる。しかしながら、推定技術が確立し、負荷の値やコイル間距離などを推定することが出来れば、通信用無線による別システムは不要となる。2次側のDC/DCを利用し、インピーダンスの情報を増やすことにより、複数負荷があった場合でも、2次側の推定を可能にした。派生技術としては、周波数を変化させることによっても2次側の情報を推定できる技術も確立した。図2には2つのコイル間距離を推定したときの構成、図3にその結果を示す。更に、精度の向上を図るために、最小二乗法を用いて複数のデータポイントを利用することで精度向上にも成功した。

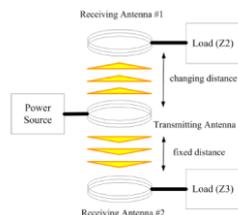


図 2 コイル二つの距離を推定したときの構成

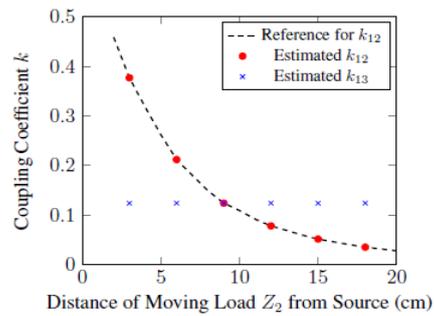


図 3 送電側から2次側のコイルの距離を推定したときの結果

(3) 複数負荷への電力任意配分

複数負荷においても電力を任意の割合で送れる理論を確立し、実証した。複数の負荷が現れた場合、電力伝送を行なうと、一般的には距離が近いほど電力を多く供給することになり、遠い対象に対しては所望の電力を供給することは困難であった。そこで、インピーダンスを調整することにより、近くであっても、遠くであっても、所望の割合で負荷に対して電力を供給できる技術を確立した。図4では、一つの送電側から二つの負荷へのワイヤレス給電の等価回路を示している。更に、理論を発展させ、N個の場合でも適用出来るように、一般化を行なった。

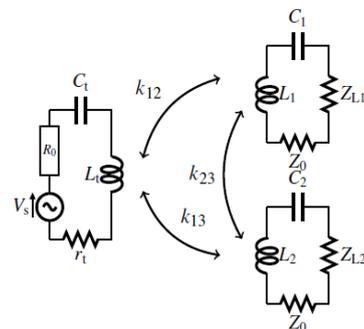


図 4 複数負荷への電力任意配分

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 4 件)

[1] TC. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori, "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", Transaction on Industrial

- Electronics, pp. 1, 2013 (査読有)
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_a11.jsp?arnumber=6226848&tag=1
- [2] 横井行雄, 居村岳広, 高橋俊輔, “日本におけるワイヤレス給電システムの技術動向と今後の展望”, 公益社団法人自動車技術会, 自動車技術, vol. 66, no. 9, pp. 94-98, 2012. 9 (査読無)
<http://ci.nii.ac.jp/naid/10031012528>
- [3] 居村岳広, “電磁界共振結合による無線電力伝送の実験的検討”, 電子情報通信学会誌, Vol. 95, No. 1 pp. 43-46, 2012, 1 (査読有)
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008898147>
- [4] 居村岳広, 「磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化」, 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 12, pp. 1373-1382, 2011. 12 (査読有)
<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201102255072223584>

[学会発表] (計 22 件)

- [1] 谷川雄介, 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一, “磁界共振結合方式を用いた三相交流ワイヤレス電力伝送の基礎実験”, 電子情報通信学会 総合大会, ISSN 1349-1377, 2013. 3. 20, 岐阜, 岐阜大学
- [2] 居村岳広, “非接触給電 磁界共鳴”, 自動車技術会 No.08-12 講習会, 電動車両技術の基礎から最新動向 ~自動車技術会が考える電動車両技術の近未来~, 公益社団法人自動車技術会 (主催), 2013. 1. 30, 東京, 発明会館
- [3] コー キム エン 居村 岳広 堀 洋一, “Impedance Inverter based Analysis of Wireless Power Transfer Consists of Repeaters via Magnetic Resonant Coupling”, 電子情報通信学会技術報告, WPT2012-38, pp. 41-45, 2012. 12. 6, 神奈川, 横須賀リサーチパーク Y R P 1 番館
- [4] 加藤 昌樹 居村 岳広 堀 洋一, “中継器による走行中ワイヤレス給電の相互結合を考慮した等価回路解析”, 電子情報通信学会技術報告, WPT2012-38, pp. 41-45, 2012. 12. 6, 神奈川, 横須賀リサーチパーク Y R P 1 番館
- [5] Masahiko Tsuboka, Takehiro Imura, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Receiving Resonator Design for Efficiency Maximization in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling, The 2012 International Conference on Broadband and Biomedical Communications, 2012. 11. 5, Sydney, Australia
- [6] Vissuta Jiwariyavej, Takehiro Imura, Yoichi Hori, Coupling Coefficients Estimation of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonance Coupling using Information from Either Side of the System, The 2012 International Conference on Broadband and Biomedical Communications, 2012. 11. 5, Sydney, Australia
- [7] Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takehiro Imura and Yoichi Hori, Multi-receiver and Repeaters Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling - Impedance Matching and Power Division Utilizing Impedance Inverter -, The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), 2012. 10. 23, Hokkaido Citizens Actives Center Nishi 7-chome, Hokkaido, Japan
- [8] Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takehiro

- Imura and Yoichi Hori, Impedance Matching and Power Division Algorithm considering Cross-Coupling for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance, INTELEC 2012 34th International Telecommunications Energy Conference, 2012.10.4, Scottsdale, USA
- [9] Masaki Kato, Takehiro Imura, Yoichi Hori, The Characteristics when Changing Transmission Distance and Load Value in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling, INTELEC 2012 34th International Telecommunications Energy Conference, 2012.10.3, Scottsdale, USA
- [10] 長井千明, 安藤賢一, 渡辺和哉, 鶴山雅夫, ジワリヤウエートウィツター, 居村岳広, 堀洋一, “水を媒体として無線電力伝送を利用したモニタリング”, 日本原子力学会 2012 年秋の大会, B, pp. 44, 2012.9.21, 広島, 広島大学東広島キャンパス
- [11] 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一, 「走行中ワイヤレス給電用アンテナに関する受電位置と効率に関する検討」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, Vol. II, pp. 219-222, 2012.8.23, 千葉, 千葉工業大学津田沼キャンパス
- [12] Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takehiro Imura and Yoichi Hori, “Novel Band-Pass Filter Model for Multi-Receiver Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling and Power Division”, IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON 12), pp. 1-6, 2012.4.17, Cocoa Beach, Florida, USA
- [13] Palakon Kotchapansompote, Yafei Wang, Takehiro Imura, Hiroshi Fujimoto Yoichi Hori, “Electric Vehicle Automatic Stop using Wireless Power Transfer Antennas”, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2011.11.9, Melbourne, Australia
- [14] Takehiro Imura, Takuya Koyanagi, Masaki Kato, Teck Chuan Beh, Yusuke Moriwaki, Yoichi Hori, “Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling from the Standpoint of an Equivalent Circuit”, Fra2-1, ISAP, 2011, 10.28, jeju, Korea
- [15] Yusuke Moriwaki, Takehiro Imura, Yoichi Hori, “Basic Study on Reduction of Reflected Power Using DC/DC Converters in Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling”, INTELEC. 2011.10.10, Amsterdam, Netherlands
- [16] Jiwariyavej, Takehiro Imura, Takuya Koyanagi, Yusuke Moriwaki, Yoichi Hori, Chiaki Nagai, Kenichi Ando, Kazuya Watanabe, Masao Uyama, “Basic Experimental Study on Effect of Bentonite to Efficiency of Wireless Power Transfer Using Magnetic Resonance Coupling Method”, INTELEC2011, 10. October 2011, Amsterdam, Netherlands
- [17] Takehiro Imura, Yoichi Hori, “Optimization using Transmitting Circuit of Multiple Receiving Antennas for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling”, INTELEC. 2011.10.10, Amsterdam, Netherlands
- [18] 居村岳広・堀洋一, “磁界共振結合を用

いたワイヤレス電力伝送における複数給電の等価回路化”,平成23年電気学会産業応用部門大会, 2-9, pp. II-399~II-402, 2011.9.6 (沖縄, 琉球大学)

[19] 森脇悠介・居村岳広・堀 洋一, “磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送のDC/DC コンバータを用いた負荷変動時の反射電力抑制に関する検討”,平成23年電気学会産業応用部門大会 2-10 pp. II-403~II-406 2011.9.6 (沖縄, 琉球大学)

[20] Takehiro Imura, “Equivalent Circuit for Repeater Antenna for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling Considering Signed Coupling”, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, p.p.1501-1506, 2011.6.22, Beijin, China

[21] Takehiro Imura, Yoichi Hori, “Equivalent Circuit of Repeater Antenna for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling Considering Cross Coupling, EVTeC’ 11, 20117266, 2011.5.19, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan

[22] Masaki Kato, Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Loss Reduction in Antenna for Wireless Power Transfer by Magnetic Resonant Coupling”, EVTeC’ 11, 20117264, 2011.5.19, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan

[図書] (計 2 件)

[1] 居村岳広, “電磁共鳴による非接触給電技術と研究動向”, 電池システム技術 電気自動車・電車へのエネルギーストレージ応用, 電気学会・移動体用エネルギーストレージシステム技術調査専門委員会編, 4

章 4 節 2 項, pp.251-264, オーム社, 2012.5.25 (執筆依頼), 288 頁

[2] 居村岳広, “電磁共鳴方式によるEV/HEV用ワイヤレス電力伝送の最新技術~原理、位置ズレ対策中継アンテナを利用した電送など~”, EV/HEV用電池と周辺機器・給電システムの最適化・高効率化技術, 第9章, 第1節, pp.315-332, 情報機構, 2011.6.22 (執筆依頼), 432 頁

[その他]

ホームページ等

http://mizugaki.iis.u-tokyo.ac.jp/2007/imura/IT_Web/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

居村 岳広 (IMURA TAKEHIRO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号 : 30596193