

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709020

研究課題名(和文)磁界共鳴によるユビキタスエネルギー社会の実現に向けた研究

研究課題名(英文)Study on Realization of Ubiquitous Energy Society by Magnetic Resonance Coupling

研究代表者

居村 岳広 (Imura, Takehiro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30596193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は『磁界共鳴によるユビキタスエネルギー社会の実現に向けた研究』と題し、主にN対N給電システムにフォーカスし包括的な研究を4年かけて行い、次の成果が得られた。(1)複数給電使用時の効率向上現象の解明、(2)クロスカップリングキャンセリング法、(3)2次側単独での効率と所望電力同時実現、(4)ロバストなワイヤレス電力伝送システム構築、(5)磁界共鳴と電磁誘導の統一理論の構築、(6)漏洩電磁波抑制

上記以外にも多くの成果が得られ、本課題を通して大きな成果をあげることができ、本課題の目的を達成できたといえる。

研究成果の概要(英文)：This research is titled as “Study on Realization of Ubiquitous Energy Society by Magnetic Resonance Coupling”. This project focuses on N- N wireless power transfer system. It is composed by multiple transmitters and multiple receivers. In four years, this project has achieved the following important results: 1) clarification of the phenomenon causing an improvement of total efficiency under wireless power transfer from multiple systems, 2) cross coupling cancelling method, 3) simultaneous maximum efficiency and desired power control at secondary side, 4) creation of robust wireless power transfer system, 5) formulation of an unified theory of magnetic resonant coupling and electromagnetic induction, 6) suppression of leakage electromagnetic wave.

Many other results have also been reached. I got many achievements throughout this project, therefore I can conclude that this project has been completed successfully.

研究分野：電気電子工学，ワイヤレス電力伝送

キーワード：ワイヤレス電力伝送 磁界共振結合 磁界共鳴 電界共鳴 電磁誘導 ユビキタスエネルギー 非接触電力伝送 センサ

1. 研究開始当初の背景

【磁界共鳴とは】

2007年に発見された磁界共鳴方式^[1]は従来の電磁誘導方式では不可能であった大エアギャップかつ高効率を達成できる新しいワイヤレス給電方式である。磁界共鳴の特徴としては、電磁誘導の共振条件を絞り、送受共に高 Q の狭帯域で動作させるため大きなエアギャップで高効率の電力伝送を実現でき、更に磁界共鳴特有の現象を備えている。従来の電磁誘導では存在しない概念であった電力を中継できる中継コイル (図 1) は一つの象徴である。一方、高 Q の超狭帯域の共振状態で常に安定動作させる技術が必要である。つまり、共振周波数とインピーダンスの最適化を常に全ての箇所で行なう必要があり、従来の電磁誘導に比べて高度な技術が必要とされている。

【申請者の研究成果】

近年、世界中でこの技術に注目が集まっており、その研究活動も活発になっている。当時は日本のワイヤレス給電のセッションは電子情報通信学会にも電気学会にもなかったが、現在では上記以外でも多くの学会で目にするようになった。しかしながら、現在も文献[1]の後追い研究に留まっている。申請者は、2007年からいち早く研究し、MIT方式に捉われない視点で数多くの発表をしてきており、国内はもとより海外でも IEEE でのパネルセッション招待を始め、多くの招待講演を行っており、日本のプレゼンスを示す研究室となっている。電気自動車への磁界共鳴によるワイヤレス給電や、磁界ではなく電界共鳴の実証、また、電力を中継できる中継コイルの定式化や、複数負荷への給電の定式化などをいち早く行い、いまでは、磁界共鳴においては一般に使われる式になっている。

【ユビキタスエネルギー社会】

将来のワイヤレス給電の市場規模は携帯電話を超えるとされている。今後の社会の発展とワイヤレス給電の発展を考えると、いつでもどこでも電力の融通が出来るユビキタスエネルギー社会が到来することは必然である。ユビキタスエネルギー社会では、いつでもどこでも情報のやりとりができるユビキタス社会同様に、エネルギーをいつでもどこでもワイヤレスで享受できる社会である。そこでは、ユーザーが充電の意識をすることなしに、モバイル機器が自動充電される。その様に成熟された社会では、社会全体のエネルギーの最小化を行うために、クリーンエネルギーで生成し貯蓄したエネルギーを、ワイヤレスで相互に融通し、社会全体のエネルギー使用を最小化させるエネルギーマネジメント技術も成熟しているはずである。また、一対一の給電によるいつでもどこでも自動

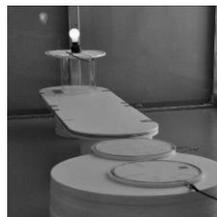


図 1 中継コイル

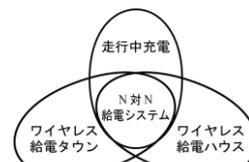


図 2 ユビキタスエネルギー社会の構想

充電という技術は成熟しているはずである。しかしながら、ユビキタスエネルギー社会を実現させるために、難易度が高く基盤技術として欠かせない技術である、N 対 N 給電システムに関する研究がなされていない。

【社会構想と N 対 N 給電技術】

ユビキタスエネルギー社会構想を図 2 に示す。ユビキタスエネルギー社会のビジョンとして、走行中充電、ワイヤレス給電ハウス、ワイヤレス給電タウンを掲げる。人体防護の観点から給電方法は各々異なる方法を想定している。このユビキタスエネルギー社会では、技術的には、複数の給電源に対し、複数の中継コイル、そして複数の受電コイルが混在する大規模な N 対 N のシステムが普及していく。現状のワイヤレス給電は、送受電コイルの一対一システムになってしまっているが、家庭内での使用方法や、走行中充電などの様々な使用シーンを考えると、N 対 N になることは当然であり、一対一の基本システムからの脱却が必要である。

[1] André Kurs, et al., “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” in *Science Express* on 7 June 2007, Vol. 317. no. 5834, pp. 83-86

2. 研究の目的

本研究は『磁界共鳴によるユビキタスエネルギー社会の実現に向けた研究』と題し、磁界共鳴によるワイヤレス給電の包括的な研究を 4 年かけて行なう。今後、ワイヤレス給電の適応先は、送電・受電・中継コイルが入り交じった、多対多 (以下、N 対 N) の磁界共鳴型ワイヤレス給電システムに移行していく。しかしながら、N 対 N 給電システムに適応できる理論の不足が否めない。更には、N 対 N 給電システムを実現するための前段階の研究も虫食い状態であり、多様な技術分野で構成される磁界共鳴技術に対して、N 対 N 給電システムにフォーカスし包括的に研究する必要がある。これにより、関連分野である、アンテナ工学、共振器理論、制御工学、パワーエレクトロニクスなどの学術的な新しい方向性を実証実験により示すこと、そして、ワイヤレス給電の産業の活性化を目的とする。

3. 研究の方法

初年度の早い段階で、本申請の中心である N 対 N 給電システムの中でも、特にコアとなる理論の確立を早急に行った上で、実証実験も行う。具体的には、複数給電使用時の効率についての検討と、クロスカップリングについての検討である。一方で、ユビキタスエネルギー社会全般に関わるテーマも重要な事柄であり、平行して行うスタイルとする。特に、ロバストなワイヤレス電力伝送システム構築は適用範囲が広く急務である為である。上記コアとなる課題を踏まえて、次年度以降は発展的な研究を行う。具体的な事柄は次項の研究成果と重複するので、そちらで記載することにする。

4. 研究成果

繰り返しとなるが、本研究は『磁界共鳴によるユビキタスエネルギー社会の実現に向けた研究』であり、かつ、『N 対 N 給電システムの実現』が主要な目的である。このテーマ設定のおかげで非常に多くの成果を得られたのは発表文献を見て頂ければ分かると思われるので、その中でもコアとなる 6 個の成果について取り上げる。

主に、N 対 N 給電システムの実現に係る成果として、

- (1) 複数給電使用時の効率向上現象の解明
- (2) クロスカップリングキャンセリング法
- (3) 2 次側単独での効率と所望電力同時実現

主に、ユビキタスエネルギー社会の実現に向けた研究に関する成果として、

- (4) ロバストなワイヤレス電力伝送システム構築
- (5) 磁界共鳴と電磁誘導の統一理論の構築
- (6) 漏洩電磁波抑制

を代表的な成果として、以下に解説する。

(1) 複数給電使用時の効率向上現象の解明

複数負荷への給電は中継コイルを利用する方法もあり、直線上のコイルを利用して複数給電を行うと効率が低下する現象もあり、複数給電自体へのネガティブな声も聞こえた。しかしながら、複数の電子機器へ一つの送電コイルから一度に給電する事を想定した場合、効率がどの様になるのかという正確な知見は誰も持っていなかった。そこで、理論構築をし、解析、実験を通し、一斉給電を複数負荷コイルに行うと、総合効率が上がることを実証した。本成果により、複数給電システムは、ネガティブどころか、総合効率を容易に上げることがわかった。高 Q コイルを目指すこと以外の道を示すことが出来たのは、今後、このユビキタスエネルギー社会実現のためには大きな一歩といえる。

(2) クロスカップリングキャンセリング法

複数の電子機器へ一斉に給電する事を想定した場合、受電コイル同士の距離が近くなり、受電コイル間で不要な結合が生まれることは知られていた。そして、好ましくない影響があることは知られていたが、はっきりとした現象や影響は知られてこなかった。そこで、クロスカップリングがワイヤレス電力伝送に与える現象について理論化し、クロスカップリングが効率の低下につながることを示し、かつ、その本質は周波数シフトであることを実証した。その上で、このカップリングを消し、効率を回復させる技術として、クロスカップリングキャンセリング法を提案し、その有効性を実証した。本課題は特許出願も行い、更にその成果を高く評価され、平成 27 年産業応用部門論文賞として受賞するに至った。

(3) 2 次側単独での効率と所望電力同時実現

複数の送電側の規格が混在するとき、送電側と受電側の互換性が問題になる。その際、送電側と受電側を協調させないと原理的に最大効率で動作させた上で、所望する電力を受け取ることは不可能であり、そのため、電子機器を動作させるために電力を優先し、効率は犠牲にせざるを得なかった。しかしながら、時間軸という新しい自由度を加えること、そして、磁界共鳴の電気的な特徴であるショートモードを利用することで、最大効率制御と所望電力を両立させることに成功した。

(4) ロバストなワイヤレス電力伝送システム構築

従来のワイヤレス電力伝送においては、負荷変動やエアギャップのリアルタイムの変動が少ないことから重要視されてこなかったリアルタイムにおけるロバストなシステム構築が必要とされていた。そこで、変動が生じて、常に最大効率を実現できる制御や所望電力が得られる制御を確立した。この技術は、先に述べた(3)の技術の基になっている。

(5) 磁界共鳴と電磁誘導の統一理論の構築

2007 年の発表当初より、磁界共鳴と電磁誘導の相違についての議論が巻き起こっていた。いち早く等価回路で理論化などは行ったが、それだけでは不十分であり、近年までこの論争は続いていた。その理由は、実証実験をもってだれも示した者がいないので、水掛け論が学会で繰り返されていた。そこで、丁寧に電磁誘導と磁界共鳴の差異について論じ、理論を構築し、実証実験を持って示すことにより、磁界共鳴と電磁誘導の統一理論という形で示すことが出来たのは、今後のワイヤレス電力伝送という分野の発展にとって大きく貢献できたといえる。

(6) 漏洩電磁波抑制

コイルを複数利用し、配置と位相を調整することにより、漏洩電磁波を抑制できる条件

があることを示せた。この磁界共鳴を実用化まで持って行く際に、一番のハードルとなるのは、最終的には漏洩電磁波であることが指摘されている。条件付きとはいえ、漏洩電磁波抑制法の一方法を提示できた事には大きな意義があり、2017年度の科研費若手研究(A)のテーマは、ここが出発点となっている。

上記以外にも、多くの成果が得られたが、それら発表文献は世に公開しているのでそちらに譲ることにする。いずれにせよ、上述したとおり、本課題を通して大きな成果をあげることができ、本課題の目的を達成できたといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件) 全て査読有

- ①畑勝裕, 居村岳広, 堀洋一: 磁界共振結合方式のワイヤレス電力伝送における受電側情報を用いた2変数同時推定法, 電気学会論文誌 D, Vol.137, No.2, pp. 104-111, 2017
- ②佐藤基, Giuseppe Guidi, 居村岳広, 藤本博志: ワイヤレスインホイールモータの高効率化および高応答回生の実現に関する研究, 電気学会論文誌 D, Vol.137, No.1, pp. 36-43, 2017
- ③Takehiro Imura, Y. Tomio, K. Oshima, T. Nayuki, Motoki Sato, A. Oshima: Wireless Power Transfer for Electric Vehicle at the Kilohertz Band, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.11, Issue S2, pp. S91-S99, 2016
- ④居村岳広: 共振を用いた磁界結合回路における電力伝送と磁束の関係, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 10, pp. 811-818, 2016.
- ⑤Motoki Sato, G. Yamamoto, Daisuke Gunji, Takehiro Imura and Hiroshi Fujimoto: Development of Wireless In-Wheel Motor using Magnetic Resonance Coupling, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 7, pp. 5270-5278, 2016.
- ⑥小林大太, 居村岳広, 堀洋一: 走行中ワイヤレス給電システムにおけるリアルタイム最大効率制御, 電気学会論文誌 D, Vol.136 No.6, pp.425-432 (2016-6)
- ⑦郡司大輔, 居村岳広, 藤本博志, "磁界共振結合ワイヤレス給電における相互通信を要さない伝送電力制御手法", 電気学会論文誌 D, Vol.136, No.3, pp.222-231 (2016).
- ⑧山本岳, 郡司大輔, 居村岳広, 藤本博志: ワイヤレスインホイールモータの送電電圧および負荷電圧制御による電力伝送効率最大化の検討, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 2, 2016, pp. 118-125.

⑨平松敏幸, 黄孝亮, 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一: ワイヤレス給電における送電側による最大効率と受電側による所望受電電力の独立制御, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 8, 2015, pp. 847-854.

⑩居村岳広, 堀洋一: 電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 6, 2015, pp. 697-710.

⑪居村岳広: 磁界共鳴による無線給電方式の現在と未来, 電気学会誌, Vol. 135, No. 4, pp. 620-622, 2015.

⑫郡司大輔, 居村岳広, 藤本博志, "磁界共振結合によるワイヤレスインホイールモータの電力変換回路の制御に関する基礎研究", 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No.3, pp.182-191, 2015

⑬Vissuta 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", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp. 191-200, 2015.3

⑭Koh Kim Ean, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Analysis of Dead Zone in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling for Charging Moving Electric Vehicles", International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Springer, 2015. 2.14

⑮Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Impedance Matching and Power Division Using Impedance Inverter for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling", IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 50, no. 3, pp. 2061-2070, 2014.

⑯居村岳広, "磁界共振結合を用いた複数負荷への一括ワイヤレス給電に関する研究", 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No.6, pp.625-633, 2014

⑰居村岳広, "磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送におけるクロスカップリングキャンセリング法の提案", 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No.5, pp.564-574, 2014

⑱TC. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori, "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.60, No. 9, pp. 3689-3698, 2013.9

〔学会発表〕(計 109 件)

- ① Katsuhiro Hata, Takehiro Imura, Yoichi Hori : Efficiency Maximization of Wireless Power Transfer Based on Simultaneous Estimation of Generalized Two Parameters, SPEC2016 , Auckland , New Zealand , (2016-12-5~8)
- ② Takehiro Imura, Yoichi Hori: Superiority of Magnetic Resonant Coupling at Large Air Gap in Wireless Power Transfer, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016/10/23-2016/10/27, Firenze, Italy.
- ③ Takuma Takeuchi, Takehiro Imura, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori: Power Management of Wireless In-Wheel Motor by SOC Control of Wheel Side Lithium-ion Capacitor, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016/10/23-2016/10/27, Firenze, Italy.
- ④ Katsuhiro Hata, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Efficiency Maximization of Wireless Power Transfer Based on Simultaneous Estimation of Primary Voltage and Mutual Inductance Using Secondary-Side Information, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016/10/23-2016/10/27, Firenze, Italy.
- ⑤ Giorgio Lovison, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Secondary-side-only Simultaneous Power and Efficiency Control by Online Mutual Inductance Estimation for Dynamic Wireless Power Transfer, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016/10/23-2016/10/28, Firenze, Italy.
- ⑥ Koichi Furusato, Takehiro Imura, Yoichi Hori,: Multi-band Coil Design for Wireless Power Transfer at 85 kHz and 6.78 MHz Using High Order Resonant Frequency of Short End Coil, ISAP2016, Okinawa, Japan, (2016-10-24~28) Okinawa, Ginowan, Okinawa Convention Center
- ⑦ Danyang Cui, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Cross Coupling Cancellation for All Frequencies in Multiple-Receiver Wireless Power Transfer Systems, ISAP2016, Okinawa, Japan, (2016-10-24~28) Okinawa, Ginowan, Okinawa Convention Center
- ⑧ Takuma Takeuchi, Takehiro Imura, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Daisuke Gunji: Study on Energy System Configuration of Wireless In-Wheel Motor with Supercapacitor, EVS29, Montreal, Canada, (2016-6-19~22)
- ⑨ Katsuhiro Hata, Daita Kobayashi, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Dynamic Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles to Simplify Ground Facilities - Real-time Power Control and Efficiency Maximization -, EVS29, Montreal, Canada, (2016-6-19~22)
- ⑩ Daita Kobayashi, Katsuhiro Hata, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Sensorless Vehicle Detection Using Voltage Pulses in Dynamic Wireless Power Transfer System, EVS29, Montreal, Canada, (2016-6-19~22)

- ⑪ Giorgio Lovison, Daita Kobayashi, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Secondary-side-only Simultaneous Power and Efficiency Control in Dynamic Wireless Power Transfer System, EVTeC & APE Japan 2016, Kanagawa, Yokohama, Pacifico Yokohama, (2016-5-25~27)
- ⑫ Motoki Sato, Giuseppe Guidi, Takehiro Imura, Hiroshi Fujimoto: Experimental Verification for Wireless In-Wheel Motor using Synchronous Rectification with Magnetic Resonance Coupling, EVTeC & APE Japan 2016, Kanagawa, Yokohama, Pacifico Yokohama, (2016-5-25~27)
- ⑬ Katsuhiro Hata, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Simultaneous Estimation of Primary Voltage and Mutual Inductance Based on Secondary-Side Information in Wireless Power Transfer Systems, WPTC 2016, Aveiro, Portugal, (2016-5-5~6)
- ⑭ Koichi Furusato, Takehiro Imura, Yoichi Hori: Design of Multi-frequency Coil for Capacitor-less Wireless Power Transfer using High Order Self-resonance of Open End Coil, WPTC 2016, Aveiro, Portugal, (2016-5-5~6)
- ⑮ Takurou Nishimura, Katsuhiro Hata, Takehiro Imura, Yoichi Hori : Velocity Estimation and Control of DC Motor Driven by Wireless Power Transfer, AWPT2016, Sichuan, China, (2016-12-16~18)
- ⑯ Koichi Furusato, Takehiro Imura, Yoichi Hori : Improvement of 85 kHz self-resonant open end coil for capacitor-less wireless power transfer system , AWPT2016 , Sichuan, China , (2016-12-16~18)

〔図書〕(計 4 件)

- ①居村岳広, “磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送”, 森北出版, 全 416 頁, 2017. 1. 31, ISBN : 9784627736610

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称 : 無線電力伝送装置

出願番号 : 特願 2014-25194

発明者 : 居村岳広

出願年月日 : 平成 26 年 2 月 13 日

〔その他〕

(受賞) 居村岳広, “平成 27 年産業応用部門論文賞”, 2015. 9. 3

(URL)

http://hflab.k.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・大学院工学系研究科・特任講師

研究者番号 : 3059193