

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：14603
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2019
課題番号：18K13758
研究課題名（和文）Establishment of Complete Theory on Resonance, Energy Transfer Mechanism and Efficiency Maximization for Multiple-Input Multiple-Output Inductive Power Transfer
研究課題名（英文）Establishment of Complete Theory on Resonance, Energy Transfer Mechanism and Efficiency Maximization for Multiple-Input Multiple-Output Inductive Power Transfer
研究代表者
DUONG QuangThang (Duong, QuangThang)
奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教
研究者番号：40757811
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、複数の送電コイルと複数の受電コイルからなる多対多無線給電を研究対象にし、最大効率制御の理論の構築と、柔軟と安全な給電の実現を目的とし、5つの検討に分けて進めた。検討1では、コイル電流の位相の統一により高効率伝送に必要な共振条件を達成した。検討2では、さらに電流振幅をコイル系パラメータに合わせて最大効率を達成できた。検討3では、エネルギーの流れを解析に加え、最大効率制御のためのkQ積理論を完成させた。検討4と5では、複数送電コイルの磁界制御効果と電力分散効果を活用し、受電対象への電力分配と安全な給電を実現した。本研究は、4件の雑誌論文、12件の学会発表及び2件の受賞で成功に終わった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線給電のための最大効率制御についてはすでにkQ積理論が提案されたが、これは送電コイルが1つ、受電コイルが1つの伝送に限定された理論である。本研究はこの理論を任意の数の送受電コイルからなる多対多伝送に拡張することにより、一般化したkQ積理論を完成させ、システム評価及び最適化設計のための1つのツールを構築した。

また、本研究では多対多伝送により柔軟かつ安全な無線給電は可能であることを示し、この分野の今後の発展を促進できたと考える。

研究成果の概要（英文）：The purposes of this research are: (1) to establish a theory for efficiency maximization, and (2) to realize flexible and safe wireless charging using multiple-input multiple-output transmissions. This research has been divided into 5 work packages (WPs). In WP 1, by aligning the phases of the coil currents, we have been successfully obtained the resonance condition, which is necessary for efficiency enhancement. In WP 2, by adapting the current amplitudes to the parameters of the coil system, we have maximized the efficiency. In WP 3, we have completed our efficiency maximization theory, the so-called kQ-product theory, by adding energy flow into analyses. In WPs 4 and 5, we have exploited the magnetic field manipulating and the power decentralizing capabilities of multiple transmit coils to flexibly distribute the received powers and realize safe wireless charging. This research has been successfully finished with 4 journal papers, 12 conference presentations and 2 awards.

研究分野：電気通信

キーワード：kQ積理論 多対多伝送 無線給電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電磁誘導に基づく無線給電技術はケーブルを使わなくてもモバイル機器、無人搬送車、電気自動車等のデバイスを充電できる。あらゆるアプリケーションにおいて高い電力伝送効率が求められるため、効率拡大制御は盛んに研究されている。1つの送電コイルから1つの受電コイルまでの伝送において、最大効率制御はkQ積理論によりすでに確立された。このような1対1伝送においては、受電コイルを電源周波数と共振させると同時に、送受電コイルの電流をコイル系のパラメータに合わせることで効率を最大化できることが広く知られている。

(2) 送受電側でコイルの数を増やしてそれぞれ複数コイルを用いることで、磁界制御効果と電力分散効果が期待できる。磁界制御効果は、各送電コイルの電流を制御することで、各受電対象に供給する電力を制御でき、受電対象がそれぞれで要求する電力レベルを満たせる効果である。電力分散効果は、もともと送りたい1つの大電力をより小電力の流れを複数に分けることで安全に伝送できる効果である。多対多伝送にはこのような効果は期待されるが、送電コイル間干渉、受電コイル間干渉及び複雑なエネルギーの流れより、共振条件の維持および効率の最大化は困難であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第1目的は、多対多伝送のための共振条件を明らかにし、その結果に基づき最大効率制御の理論を構築することである。また、エネルギーの流れを解析することで、最大効率達成時とそうでない時との差異を定性的に評価する。

(2) 第2目的は、多対多伝送の磁界制御効果と電力分散効果を活用し、柔軟かつ安全な無線給電システムの実現である。

3. 研究の方法

(1) 本研究は次の通り5つの検討に分けて進めた。検討1では、多対多伝送の共振条件を明らかにした。検討2では、検討1の結果をもとに最大効率制御の原理を構築した。検討3では、エネルギーの流れを解析し、最大効率達成時の定性的な評価を行った。検討4では、多対多伝送の磁界制御効果を活用し、受電対象が複数に存在する場合の電力分配を行った。検討5では、電力分散効果を活用し、複数小型の電源でより大電力無線伝送を実現した。

(2) 上述した5つの検討については、まず数学モデルで最適解を解析で求め、計算機シミュレーション、または検証実験で最適解の有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) 検討1では、簡単のため2つの送電コイルと2つの受電コイルからなる2対2伝送を前提にし、共振条件を求めた。その結果、送電コイル電流の位相を揃えるとともに、受電コイル電流の位相も揃えることで共振が取れて効率よく給電できることを明らかにした。(業績7件目、10件目と11件目)

(2) 検討2では、送電コイルの数を任意の数M、受電コイルの数を任意の数Nにし、一般化したM対N伝送に対して最大効率制御の原理を検討した。その結果、コイル電流の位相を揃え、かつコイル電流の振幅も送受電コイル系全体のパラメータに合わせることで電力伝送効率を最大化できることが分かった。この結果は、1対1伝送のための従来のkQ積理論を多対多伝送のために拡張した。また、拡張されたkQ積理論にしたがって制御すれば多対多伝送におけるコイル間干渉を完全に除去できることも理論で示した。(業績2件目、4件目、5件目と15件目)

(3) 検討3では、電磁界解析ソフトウェアを用いて多対多無線給電システム内のポインティングベクトルを算出し、エネルギーの流れを分析した。解析結果より、最大伝送効率達成時は送電コイル間および受電コイル間のエネルギーの伝達はないことが分かった。これはkQ積理論に基づく制御はコイル間干渉を完全に除去できることを改めて立証し、この理論をより充実させた。(業績6件目)

(4) 検討4では、多対多伝送において各送電コイルの電流を制御することで電力分配を効率よく行った。一例の結果を図1に示す。同図において、Tx#1とTx#2の2つの送電コイルが同時に

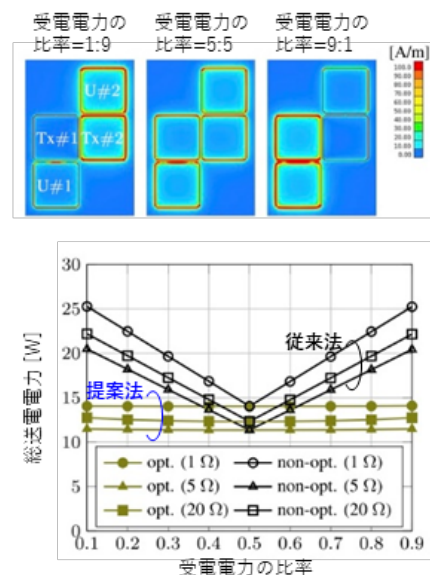


図1 2対2無線給電による磁界制御効果 (業績3件目の一部)

受電コイル対象 U#1 と U#2 に給電している。この際、受電対象の所要電力の割合 (U#1:U#2) の任意の値 1:9、～、5:5、～、9:1 に応じて送電コイル Tx#1 と Tx#2 の振幅を調整している。また、検討 1 で得られた知見を活かして送電コイル電流の位相も揃えている。結果的に、総送電電力を抑え、高効率を維持しながら、受電コイル対象にそれぞれの所要電力を供給できた。(業績 1 件目、3 件目、14 件目と 16 件目)

(5) 検討 5 では、4 つの送電コイルを用い、そもそも送りたい電力を 4 つに分け、1 つの受電コイルへの給電を行った。この際、検討 2 で構築した kQ 積理論を用いて 4 つの送電コイル電流の制御を行った。その結果を図 2 に示す。図 2 の右図において、赤線の「MISO(Tx4)」は 4 つの送電コイルで分散して給電を行っている提案法であり、黒線の「SISO」は 1 つの送電コイルだけで電力分散をしない従来法である。同図より提案法を用いることで従来法と同等の効率を達成しながら電力分散ができていいることが言える。さらに、受電コイルが送電コイルと垂直になった時 (角度 θ が 90° の時)、従来法の効率は 0% になり全く給電できていないが、提案法は高い効率を維持している。これ結果は、改めて多対多伝送の柔軟性を明示した。(業績 8 件目、9 件目、12 件目と 13 件目)

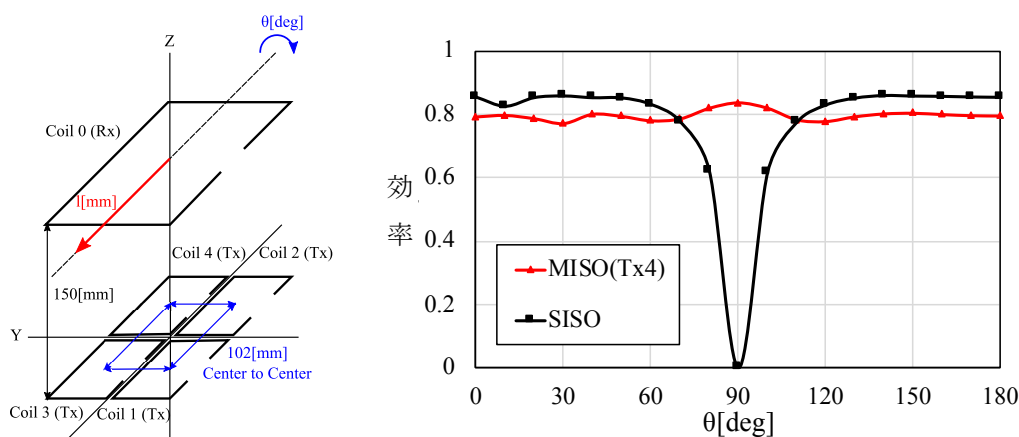


図 2 4 対 1 無線給電による電力分散効果 (業績 13 件目の一部)

(6) 検討 1、2、3 を合わせた成果は無線給電技術の最大効率制御理論を完成させた。従来の kQ 積理論は、送電コイルが 1 つと受電コイルが 1 つの構成に限定された理論に対して、本研究で構築した多対多 kQ 積理論は送受電コイルの数がそれぞれ任意になった場合でも適用できる。本研究開始当初で設定した第 1 目的は達成した。

(7) 検討 4 と検討 5 を合わせた成果は、多対多伝送は柔軟かつ安全な無線給電が可能であることを示した。これより、この分野の今後の発展を促進することに貢献している。本研究の第 2 目的も達成した。

(8) 業績としては、雑誌論文を 4 件、学会発表を 12 件行い、2 つの賞を受けた。

<引用文献>

① 大平 孝、ワイヤレス電力伝送の kQ 積理論入門、特別小特集東海発ワイヤレス;電力伝送、98 巻、10 号、2015、885-887

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Vo Quoc-Trinh, Duong Quang-Thang, Okada Minoru	4. 巻 7
2. 論文標題 Load-Independent Voltage Control for Multiple-Receiver Inductive Power Transfer Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 139450 ~ 139461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2943541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 SUGIYAMA Reona, DUONG Quang-Thang, OKADA Minoru	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Maximum Achievable Efficiency for Multiple-Receiver Inductive Power Transfer Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1861 ~ 1868
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E101.A.1861	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 DUONG Quang-Thang, OKADA Minoru	4. 巻 E101.B
2. 論文標題 Receive Power Control in Multiuser Inductive Power Transfer System Using Single-Frequency Coil Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 2222 ~ 2229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2017EBP3387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Duong Quang-Thang, Okada Minoru	4. 巻 66
2. 論文標題 Maximum Efficiency Formulation for Multiple-Input Multiple-Output Inductive Power Transfer Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques	6. 最初と最後の頁 3463 ~ 3477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMTT.2018.2805339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2. 発表標題 kQ-Theory for MIMO IPT
3. 学会等名 2019 Asia-Pasific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2. 発表標題 Illustration of Energy Flows in IPT Systems with Multiple Transmitters and/or Multiple Receivers
3. 学会等名 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vo Quoc-Trinh, Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2. 発表標題 Serial Compensation for Two-receiver Inductive Power Transfer Systems with Load-independent Output Voltages
3. 学会等名 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duong Quang-Thang
2. 発表標題 Recent Research Activities on Dynamic Charging Techniques
3. 学会等名 2019 International Symposium for Advanced Computing and Information Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duong Quang-Thang
2. 発表標題 動的ワイヤレス給電の最新研究動向
3. 学会等名 ワイヤレスコンソーシアム合同WG (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vo Quoc-Trinh, Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2. 発表標題 Resonance in Two-receiver Inductive Power Transfer Systems with Two Coplanar Transmitters
3. 学会等名 The 12th International Conference on Advanced Technologies for Communication (ATC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vo Quoc-Trinh, Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2. 発表標題 Efficiency Improvement for Three-coil Cooperative Inductive Power Transfer Systems
3. 学会等名 Wireless Power Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duong Quang-Thang
2. 発表標題 MIMO-IPT for Flexible Wireless Charging
3. 学会等名 2018 International Symposium for Advanced Computing and Information Technology (招待講演)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2 . 発表標題 Performance Comparison for SISO and MISO Inductive Power Transfer
3 . 学会等名 2018 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Duong Quang-Thang, Okada Minoru
2 . 発表標題 A Secure Inductive Power Transfer Using 2x2 MIMO
3 . 学会等名 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Aoki, Q. Yuan, Duong Quang-Thang, Okada Minoru, H. M. Hsu
2 . 発表標題 Maximum Transfer Efficiency of MIMO-WPT System
3 . 学会等名 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Quoc-Trinh Vo, Duong Quang-Thang Duong, Okada Minoru
2 . 発表標題 Transmitter-Side Voltage Control for Two-Receiver Inductive Power Transfer System
3 . 学会等名 2018 Asian Wireless Power Transfer Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Duong Quang-Thang, Young Engineer Award and Michiyuki Uenohara Memorial Award, IEEE MTT-S Japan, Nov. 28, 2019.
https://www.ieee-jp.org/section/tokyo/chapter/MTT-17/award/YEA_past_awardees/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----