

令和元年6月16日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06335

研究課題名(和文) 磁界共振結合型無線電力伝送における動的な人体防護方式に関する研究

研究課題名(英文) Research on Dynamic Human Protection System in Magnetic Resonance Coupled Radio Power Transmission

研究代表者

川原 圭博 (Kawahara, Yoshihiro)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号：80401248

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)：電気自動車や電子機器への給電をワイヤレス化する手法として磁界共振結合型の無線電力伝送が注目されている。本手法の実用化に際しては効率を高めながらも人体曝露を考慮した漏洩電磁界への対策が必須である。本研究では、漏洩電磁界と、受電機器の負荷インピーダンス、送受電器間における電流の振幅および位相差、そして、送電器をアレイコイルとした時に各コイルが遠方の電磁界に与える影響などを考慮することにより、送受電器間の電力の送受信をきちんと実現しながらも、不要な場所での電磁界強度を抑制する方法を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、電気自動車や様々な機器の無線給電システムを実現しながら、人体への不要な電磁界曝露を低減させるための複数の手法に関する取り組みである。無線給電システムは効率や伝送距離ばかり注目されがちであるが、生活空間での利用、大電力の利用を考えると、電力伝送に不要な電磁界強度は可能な限り下げるべきであり、そうした要求に対して一石を投じる研究であると自負している。既存手法においては、人が近づきうる機器では伝送電力を数ワット程度以下に抑えるという、静的な抑制手法が取られているにすぎないが、送電器から受電器までシステム全体としてのふるまいを考えることが本手法の考案につながった。

研究成果の概要(英文)：Magnetic resonance coupling is considered as a promising technique for wireless power supply to electric vehicles and electronic equipment. In reality, it is indispensable to take measures for leakage electromagnetic field considering human body exposure, while improving efficiency. In this study, several methods to suppress undesired leakage of the electromagnetic field is considered. The key to realizing the contradictory demand was the analysis of the relationship among the load impedance of the receiving equipment, the amplitude, phase difference of the current between the transmitters and the receivers, and the influence of each coil on the distant electromagnetic field.

研究分野：無線給電

キーワード：無線電力伝送 電磁界共振結合 電気自動車

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

電気自動車や電子機器への給電をワイヤレス化する手法として、磁界共振結合型の無線電力伝送が注目を集めている。実用化に際しては人体曝露への対策が必須であり、人体が送受電器に近接する場合には出力電力を下げる必要がある。既存手法においては、人が近づきうる機器では伝送電力を数ワット程度以下に抑えるという、静的な抑制手法が取られているにすぎない。

2. 研究の目的

本研究では、漏洩電磁界と、受電機器の負荷インピーダンス、送受電器間における電流の振幅および位相差、そして、送電器をアレイコイルとした時に各コイルが遠方の電磁界に与える影響などを考慮することにより、送受電器間の電力の送受信をきちんと実現しながらも、不要な場所での電磁界強度を抑制する方法について複数の観点から検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、各共振器を流れる電流の振幅比および位相差に基づき電磁界強度が増減する現象に着目し、電磁界強度を人体防護指針よりも小さくするシステムの実現が可能かについて検討を行う。具体的には、送受電器が1対1の構成および送電器アレイを用いる多対1の構成のそれぞれに対して、漏洩電磁界強度が最小となる電流の振幅比および位相差を導出し、このときの電磁界強度抑制効果を確認する。加えて、この条件を満足するためのパラメータ決定手法を確立することで、電磁界強度を抑制した人体に安全なシステムの実現を目指す。

4. 研究成果

漏洩電磁界が受電機器の負荷インピーダンスに依存して変化することを利用し、負荷インピーダンスを送電効率が最大となる時の値から変化させることで、送電効率の低下を許容範囲に抑えながらも、漏洩電磁界を低減させることができる手法を提案した。シミュレーションでは受電側負荷インピーダンスによって電磁界分布が変わり、送電効率最大となる負荷インピーダンスの場合よりも、最大電磁界が小さくなる負荷インピーダンスが存在することを確認した。今回使用した送受電器は直径20cm、送受電器間距離0.5cm、巻き数1のコイルのほか、卓上給電を想定し、受電器は外径5cm、内径4cmとし、巻き数は5巻とした場合も検討した。ともに共振周波数は6.78MHzである。シミュレーションの結果、回路的な磁気エネルギーが最小となる負荷インピーダンスの場合では、送電効率最大の場合比べて送受電器間距離が数mmから数cmと近い時に、漏洩電磁界が規制値内でおさまる最大送電可能電力は最大1.3倍に増加した。一方、送電効率は0.99~1.0倍とほぼ低下しなかった。

つづいて、送受電器間における電流の振幅および位相差が負荷インピーダンスに強く依存することを用い、既存の磁界強度抑制手法と同時適用可能な磁界強度抑制手法を提案した。負荷インピーダンスを用いることで、送受電器間における電流の位相差を拡大し、送電器が作り出す磁界と受電器が作り出す磁界とを一部打ち消す点がユニークであり、進歩した点となる。本手法はシステムに組込むシールドやコイルの物理構造を前提としないため、既存の磁界強度抑制手法と同時適用可能であり、さらなる磁界強度低減効果が期待できる。理論式導出の際には、無線電力伝送システム内に蓄えられる磁気エネルギーが磁界強度と正の相関関係にあることに着目し、磁気エネルギー最小化問題を解くことで磁界強度抑制のための負荷インピーダンスを求める。電気自動車への無線給電を想定した電磁界シミュレーションにより、結合係数0.35の場合に最大で15%程度の磁界強度低減が可能であること、電力効率の低下は電力効率を最大化した場合と比較して0.1%程度に留まることを明らかにし、その一方で、磁界強度は全体が均一に低減するのではなく特に送受電コイルに挟まれた空間で顕著であることを示した。

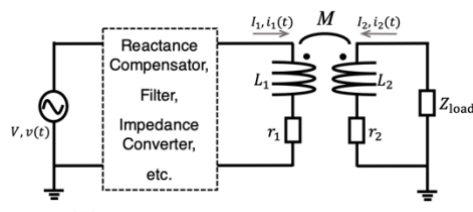
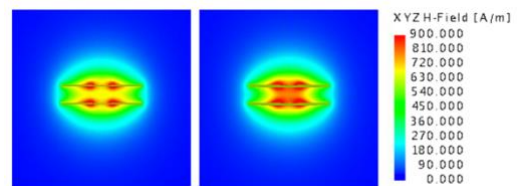


図1 無線電力伝送システムの等価回路



(a) 磁気エネルギー最小化 (b) 電力効率最大化

図2 電力効率最大化

電気自動車への給電システムを想定した図1のような等価回路であらわされるケースを想定し、シミュレーションを行った。図2(a)に、電力効率最大化のための負荷インピーダンスを接続して1kW伝送した際の磁界強度分布を図2(b)に示す。コイルの外形450mmに対して、描画範囲は1m×1mである。送受電コイルに挟まれた空間において顕著に磁界強度が低減していることを確認できる。磁界強度低減量は位置に依存しているが、送受電器に挟まれた空間における中央の点を例にとると約16%磁界強度が弱まっている。その一方で、電力効率に着目すると、磁気エネルギー最小化の場合は98.77%、電力効率最大化の場合は98.84%であり、ほぼ同等の電力効率であった。負荷インピーダンスは、結合係数

が小さくなるに従って、電力効率最大化のための負荷インピーダンスに漸近するものであるため、電力効率を大きく損なうものではないと考えられる。ただし、理論的考察によると、磁界強度低減効果は結合係数 k に依存し、結合係数が著しく小さい場合には磁界強度低減効果を発揮することができない点に注意が必要である。

さらに、送電器にアレイコイルを用いた際に、位置ずれが生じても漏洩磁界を低減可能なシステムを設計した。アレイコイルでビームフォーミングを行うような関連研究手法と異なり、送電器アレイコイルを用いて送受電コイルから発生する漏洩磁界を相殺させる条件下で、電送効率を最大化する手法について検討した。複数ループコイルから発生する漏洩磁界を定式化し、送受電器遠方の地点において各コイルからの距離が等しいと近似することで、漏洩磁界相殺のための条件式を各コイルに流れる電流に関する線型方程式として導出した (図 3)。その条件式を満たすことで、各コイルからの距離が等しいと近似できる遠方の各地点、即ち遠方全域で漏洩磁界を低減できる。この条件を伝送効率最大化のための制限式に組み込み、凸最適化を用いて解析的に最適電流を求め、最適負荷を導出した。漏洩磁界の評価は電磁界シミュレーションを用いて行った。

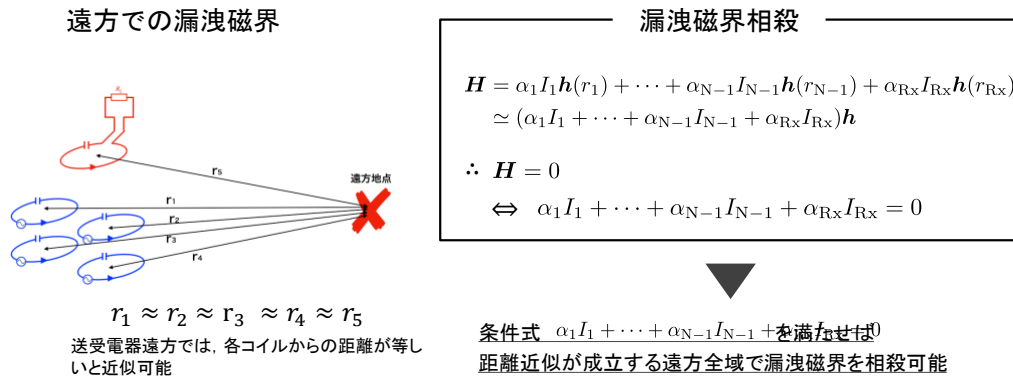


図 3 コイルアレイを用いた場合の遠方での漏洩磁界低減手法

提案手法を適用することにより、3m 離れた場所における漏洩磁界強度を 99.1% 低減しつつ、伝送効率の低下を 2% 以下に抑えることができた (図 4)。さらに、位置ずれが生じる条件下においても、位置ずれさせた全ての点において漏洩磁界を 99% 以上低減できることを確認した。伝送効率の低下幅は効率最大時と比較して 3.5% 程度以下という結果を得た (図 5)。

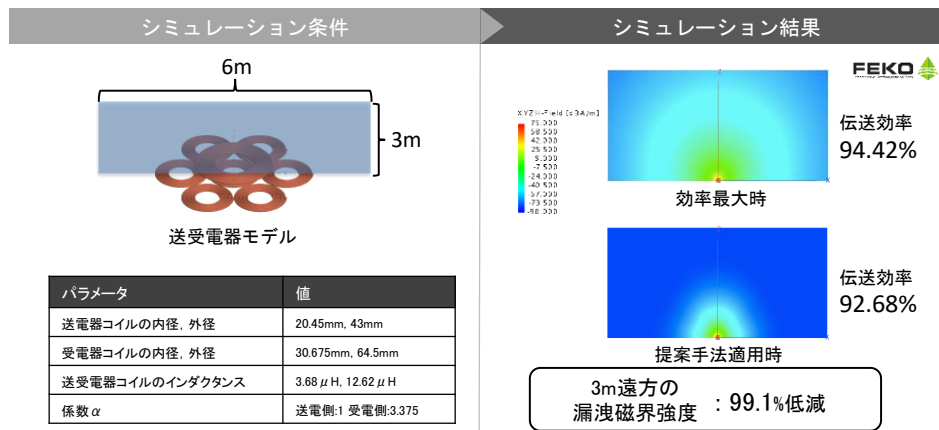


図 4 送受電器コイルの大きさが異なるシステムでの評価

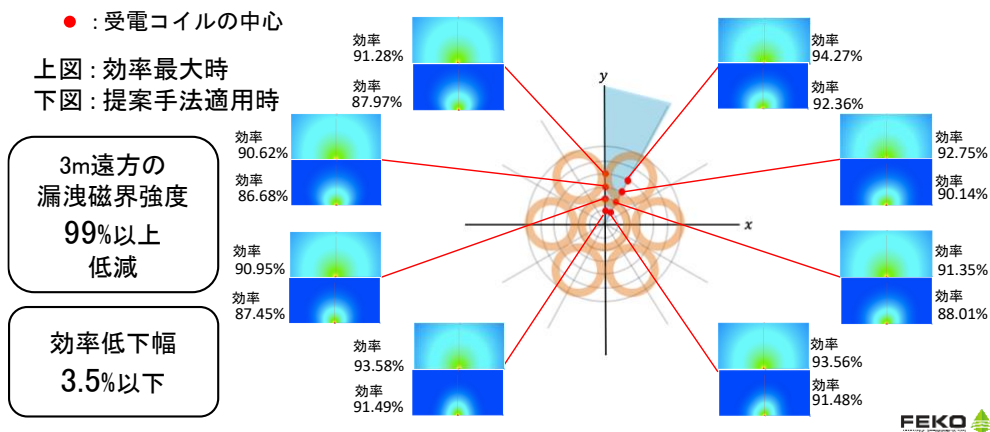


図4 受電コイルの位置ずれを考慮したシステムでの評価

さらに、現実のシステムでは、送伝送効率向上や、漏洩磁界の低減のために、送受電機に磁性体であるフェライトが取り付けられる。フェライトを取り付けた場合、磁路が変化するため、漏洩磁界の近似式が厳密に成立しない。こうした現実に近い環境において提案手法の漏洩磁界低減に対する有効性を評価するための評価も行った。

さらに、漏洩電磁界と、受電機器の負荷インピーダンス、送受電器間における電流の振幅および位相差の関係を明らかにする際に得られた知見は、応用システムを構築するための数々の重要な知見ももたらした。たとえば、コイルを薄膜フィルム上にアレイ状に配置し、切り取り可能な無線給電シートを作成したが、このアレイ同士の干渉を計算するための論拠を得た。さらに、遠方まで無線給電する際に有効な可変半径コイルを設計するための論拠にもなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

1. R. Takahashi, T. Sasatani, F. Okuya, Y. Narusue, and Y. Kawahara, "A Cuttable Wireless Power Transfer Sheet," Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (ACM IMWUT), Vol.2, No.4, Article No. 190, Dec. 2018.
2. H. Qiu, Y. Narusue, Y. Kawahara, T. Sakurai, and M. Takamiya, "Digital Coil: Transmitter Coil with Programmable Radius for Robust Wireless Powering," Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) 2018, To Appear, Montreal, Canada, June 2018.
3. Y. Narusue and Y. Kawahara, "Distributed Reactance Compensation for Printed Spiral Coils in Wireless Power Transfer," Proc. of IEEE WPTC2017, pp.1-4, Taipei, Taiwan, May 2017.

[学会発表] (計3件)

小淵大輔, 成末義哲, 川原圭博, 森川博之, "磁界結合型無線電力伝送における漏洩磁界低減型送電器アレイ駆動方式の検討," 信学技報, vol. 119, no. 11, WPT2019-1, pp. 1-6, April 2019.

成末義哲, 松浦賢太郎, 渡辺健也, 川原圭博, 森川博之, "磁界結合型無線電力伝送システムにおける磁界強度低減のための負荷インピーダンス設計," 信学総大 2018, B-21-14, March 2018.

松浦賢太郎, 成末義哲, 川原圭博, 森川博之, "磁界結合型無線電力伝送システムにおける磁界強度低減のためのリアクタンス制御回路に関する一検討," 信学総大 2018, B-21-20, March 2018.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 成末 義哲

ローマ字氏名: (NARUSUE, yoshiaki)

所属研究機関名: 東京大学

部局名：大学院工学系研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：70804772

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。