

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目

(Dissertation Title)

Study on Performance Improvement of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Using Spiral Resonators Towards Practical Use

(スパイラル共振器を用いた共振器結合型無線電力伝送システムの実用化に向けた性能改善に関する研究)

氏 名 (Name)

Nur Syafiera Azreen Binti Norodin

The number of mobile devices powered by electricity, such as smartphones and electric cars, has been increasing rapidly. In addition, there is a growing requirement for various sensors to be installed in various locations for the recently developed IoT devices.

Wireless Power Transfer (WPT) systems are attracting attention as an efficient way to transmit power to these devices without being constrained by the layout of power distribution lines. There are various types of WPT systems, including the electromagnetic induction (EM) system, the energy harvesting system which converts propagating electromagnetic waves into electric power, and the systems using electromagnetic near-field coupling. Nowadays, a non-contact power transfer system using EM induction phenomenon as a WPT system is already practical use. However, this system has several disadvantages; the power transmission distance is extremely short, and the power transmission efficiency declines rapidly if obstacles enter the power transmission path and/or if there is axial or angular misalignment between the transmitting (Tx) and receiving (Rx) units. For these reasons, Resonator-Coupled type Power Transfer (RC-WPT) system has been proposed, in which resonators are embedded in Tx and Rx units and power is transmitted by electrical or magnetic coupling between the resonators.

The RC-WPT system is capable of medium-range power transmission and is relatively resistant to axial and angular misalignments between Tx and Rx units. The resonator used in this study is a type of planar spiral resonator, which can be made compact. In the RC-WPT system, as the transmission distance extends, the power transmission path becomes wider. The wider the power transmission path, the greater the possibility for an obstacle will enter the power transmission path. In addition, as the distance between Tx and Rx units increases, it is necessary to clarify the effects and problems that may occur considering if there is a large gap such as sensors for IoT devices as well as the ways to countermeasure. Therefore, in this study, considering the practical application of RC-WPT system, the problems that need to be resolved for it to be realized are discussed in detail.

First, in the RC-WPT system, the presence of a medium with dielectric or conductive losses or lossy mediums around the system can significantly reduce the power transmission efficiency. We attributed this to the effect of the electric field generated around the resonator in the RC-WPT system. To avoid the effect of lossy mediums, a dual-spiral resonator is proposed that is capable to confine the electric field inside the resonator without using electronic elements such as capacitors. After the confirmation of the optimal layout of each element by examining in detail its quality

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)

(about 800 words)

factors (Q -factors) and coupling coefficient between resonators, the power transmission efficiency with and without lossy mediums in the power transmission path was compared. The results show that the power transmission efficiency of RC-WPT system with lossy mediums using dual-spiral resonators can be significantly improved compared to that of the system using the conventional single-spiral resonators.

Next, the characteristics of the power transmission efficiency of RC-WPT system when there is an angular misalignment between Tx and Rx units were investigated. It was observed that the power transmission efficiency of RC-WPT system for single- and dual-spiral resonators decrease as the angular misalignments increase. However, it has been shown that the degraded power transmission efficiency due to angular misalignment for each spiral resonator can be recovered by applying an appropriate axial displacement between Tx and Rx units.

In this thesis, the above discussion is presented in the following chapters. Chapter 1 describes the historical background of WPT systems, the types of RC-WPT system, and the objective and significance of studying them. Then, Chapter 2 explains the principle of RC-WPT system as well as the measurement system of Q -factors which indicated the performance of the single-spiral resonator, the coupling coefficient, and the performance of the power transmission efficiency between the resonators. Next, Chapter 3 discusses the effect of the lossy medium in RC-WPT system. Based on the measured results, when lossy mediums existed in the system, the leakage of electric field around the resonator acted as a loss and reduced the power transmission efficiency. As a countermeasure, the author discusses a method to ensure that the RC-WPT system was unaffected by lossy mediums by proposing the dual-spiral resonator. In addition, a comparative study of the performance of RC-WPT system when tap or pure water-filled acryl bases is inserted in the power transmission path for the conventional single-spiral and dual-spiral resonator was conducted and discussed. Furthermore, Chapter 4 discusses the degradation of power transmission efficiency when angular misalignment occurred between Tx and Rx units of RC-WPT system, and discusses a method to improve this by shifting the position of the Rx unit appropriately, which would enable the degraded power transmission efficiency to significantly recover. Finally, Chapter 5 is the conclusions, in which has presented summary of this study and also future perspectives.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

| | |
|--|---|
| 氏 名 | Nur Syafiera Azreen Binti Norodin |
| 審査委員 | 主 査： 堀田 昌志 |
| | 副 査： 若佐 裕治 |
| | 副 査： 山本 節夫 |
| | 副 査： 田村 慶信 |
| | 副 査： 山田 洋明 |
| 論文題目 | Study on Performance Improvement of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Using Spiral Resonators Towards Practical Use (スパイラル共振器を用いた共振器結合型無線電力伝送システムの実用化に向けた性能改善に関する研究) |
| 【論文審査の結果及び最終試験の結果】 | |
| <p>昨今の普及がめざましい IoT デバイスやスマートフォンなどへの効率的且つ接続自由度に優れた電力給電方法について調査・検討している。特に、電力ケーブルを用い無い事で、コンセントや電灯線配置に対してレイアウトフリーな電力伝送が可能な無線電力伝送方式に関して、その実用化に際して何が必要なのか？何を実現すべきなのか？といった観点からのアプローチを行っている。</p> <p>無線電力伝送システムには、現在実用化されている電磁誘導現象を利用したシステムの他に、電磁波を利用する方法、電磁界の結合を利用する方法など様々な手法が提案されている。しかし、現在主流の電磁誘導現象を利用した非接触給電方式では、電力伝送可能距離が極端に短い、送受電装置間の厳格な位置決めが要求されるといった問題点があった。また、電磁波を用いて電力を変換収集するエネルギーハーベスティング方式は、設置自由度は高いものの、電力変換効率が非常に低いと言った欠点があった。</p> <p>これに対し、マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology; MIT) の研究グループにより、無線電力伝送システム内に共振器を配置した共振器結合型無線電力伝送システムが提案され、電力伝送距離延伸や位置決め厳格緩和が可能であることが示された。その結果、無線電力伝送システムの広範囲な分野への実用化が飛躍的に現実味を帯び、非常に活発な研究が行われるようになった。しかし、その研究の多くは、電力伝送距離の延伸や伝送電力の高効率化に関するものが主であり、実用化の観点からの問題点の抽出並びに解決法検討は数少なかった。そこで、当研究室でこれまで行ってきたスパイラル共振器を利用した共振器結合型無線電力システムについて、特に実用化の際に必要な問題にフォーカスして検討を行っている。</p> | |

(様式 9 号)

前述の様に、共振器結合型無線電力伝送システムでは、

- 1) 電磁誘導方式における電力伝送距離数 cm に比べて、数メートルまで延伸できる。しかし、電力伝送距離延伸によって送・受電装置間に広い空間が出来、そこに損失を持つ障害物が入り込む可能性が高まり、電力伝送効率の低下を引き起こす可能性がある。
- 2) 位置決めの際格さ緩和により、送・受電装置の設置場所自由度が増した事で、位置ずれによる電力伝送効率低下を補償する方法が必要になる。

本研究では、1)の障害物に関する課題に対して、電磁界の内、電力損失に関連するものが電界が主であると考え、電界を共振器内部に閉じ込める構造としてデュアルスパイラル共振器を提案した。そして、損失性障害物として、水の入った水槽を電力伝送路内に配置し、伝送効率の低下を改善できる事を示している。

また、2)の位置ずれに関しては、送・受電装置間に角度ずれが存在する場合には、システム中心軸に垂直な方向への軸ずれさせる事で電力伝送効率を改善できる事を示している。なお、逆転の発想で送・受電装置間に軸ずれが存在する場合も、適切な角度ずれを付加する事で電力伝送効率を改善できる事についても述べている。

以上の結果により、本電力伝送システムにおける問題点の多くが解決でき、本システム実用化への道筋を拓く事に寄与出来たと考えられる。

公聴会における主な質問は、本システムの先行研究との比較や耐久性に関するもの、構造提案過程で現れた特異現象の説明と解釈、共振器の構造に関する解釈、共振器設計における電磁界の推定に関する詳細説明等であった。いずれの質問に対しても、発表者からの確かな回答がなされた。なお、論文タイトルについて、キャピタリゼーションルールに従って、“towards”を“Towards”とした方が良いとの意見があり、タイトル修正を行った。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計4編, 参考論文 計0編)

- 1) Nur Syafiera Azreen Norodin and Masashi Hotta, “Performance Improvement of Resonator-Coupled Wireless Power Transfer System Using Dual-Spiral Resonator with Angular Misalignments,” *URSI Journal, Radio Science Bulletin (RSB)*, no.372, pp.22-28, 2020-03.
- 2) Nur Syafiera Azreen NORODIN, Kousuke NAKAMURA, and Masashi HOTTA, “Effects of Lossy Mediums for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System using Conventional Single- and Dual-Spiral Resonators,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E105-C, no. 3, 2022-03. (now on printing)