

氏名	ダン センイ DUAN Xianyi
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1323号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Reduction of Induced Electric Field in Human Body for Non-Radiative Wireless Power Transfer Systems (非放射性無線電力伝送システムにおける人体内誘導電場の削減に関する研究)

論文審査委員	主査	教授	平田 晃正
		教授	王 建青
		准教授	平山 裕
		准教授	日景 隆 (北海道大学)
		教授	Georg Fischer (FAU)

論文内容の要旨

Non-radiative wireless power transfer (WPT) systems are widely applied technology that has found extensive applications across various industries such as small devices like smartphones and large-scale equipment, including electric vehicles (EVs). Contrary, these notable advantages also bring forth a series of challenges, including compliance assessment considerations for human protection from electromagnetic fields (EMF) and electromagnetic immunity, raising concerns about potential health risks associated with exposure to these EMFs, particularly concerning the interaction between humans and the EMF to which they are exposed. Specifically, human activities in the vicinity of the system may interfere with its efficiency, and the EMFs generated by the system can interact with biological tissues. To address these concerns, international organizations have established standards and guidelines that take into account both industrial and human safety aspects. However, with the development of WPT technology, there is a need for ongoing research and comparison of the results to safety standards to ensure their continued effectiveness while enabling efficient transmission. This study utilizes computer simulations to propose innovative system designs, with a focus on ensuring high transmission efficiency while mitigating human-system interaction and reducing the intensity of leakage fields to ensure a safety system considering various

realistic scenarios. Additionally, the research includes the calculation of *in-situ* electric field and specific absorption rate (SAR) results within human body models exposed to EMFs, with effectiveness assessments conducted through comparisons with international regulations.

A magnetic resonant coupling WPT system that utilizes a spiral resonator with a grounded loop has been proposed to mitigate its human-system interaction and achieve a high-efficiency power transfer. Specifically, the proposed grounded loop can reduce the leakage fields of the system, resulting in less interaction between the system and the human body. The electromagnetic fields distribution and the performances of the proposed WPT systems with and without the presence of a human body model were first determined using the finite-element method (FEM). Next, the *in-situ* electric field in a human body near the system was computed using the scalar-potential finite difference (SPFD) method. As a result, a transmission efficiency higher than 70% is achieved at approximately 25 cm transmission distance. The strength of the electric field outside the grounded loop was reduced. Under the conditions of maximum efficiency of the WPT system, the proposed loop reduced the *in-situ* electric field strength and the SAR values by 43.6% and 69.7%, respectively. In the worst-case exposure scenario considered, the maximum permissible input power to the system was 40 kW and 33.5 kW in compliance with the limit prescribed International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) for the whole-body averaged SAR and *ps*SAR, respectively.

A composite magnetic core has been proposed for the inductive coupling WPT system used in EV applications to reduce the impact of system magnetic field radiation on the surrounding environment while ensuring high efficiency. Specifically, the proposed core with the intermediate insert block can reduce the leakage magnetic field of the system effectively, thus increase efficiency. Three types of planar composite magnetic cores for the system have been proposed. The performances of the proposed system are calculated using the FEM. Then, considering the EV model, the transmission efficiency and magnetic field distribution of the proposed WPT systems are calculated under both perfect alignment and misalignment conditions. Subsequently, considering the exposure scenario of a human body standing near the vehicle, the SPFD method is used to assess the *in-situ* electric field in an anatomical human body to determine the assessment of exposure limits. The results indicated that proposed core structure improved transmission efficiency of the system by 34% within a 30 cm air gap at perfect alignment, effectively reduced magnetic field leakage and *in-situ* electric field by up to 91.6% and 98.3%, respectively. The maximum permissible input power to the proposed system was 4050 kW in compliance with the ICNIRP limit for the *in-situ* electric field. The findings suggested that the proposed design can enhance the transmission efficiency, reduce the leakage field and mitigate human exposure to EMFs.

論文審査結果の要旨

本論文に対し、2023年12月12日に電気・機械工学専攻内審査、2024年2月16日に公聴会および審査が行なわれた。

本論文は、非放射性無線電力伝送 (WPT) システムによる人体ばく露に着目し、安全性評価やリスクについて議論したものであり全5章より構成される。

第1章は、序論であり、本論文の研究背景と研究目的について述べている。

第2章では、本論文で用いた解析モデルと解析手法について述べている。

第3章では、人体へのばく露を軽減し、かつ高効率電力伝送を実現するため、接地ループを備えたスパイラル共振器を用いた磁界共振結合方式によるWPTシステムを提案している。提案システムからの漏洩電磁界分布および伝送効率を数値解析により算出した。その結果、接地ループを用いた場合、伝送距離25cmにおいて70%高い伝送効率を実現、かつ最大効率条件下における体内誘導電界を最大で43.6%、局所平均比吸収率 (SAR)、および全身平均 SAR を60%程度減少できることを示した。また、電波からの人体防護を目的とした、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)ガイドラインにおける制限値に対しても評価を行い、接地ループを用いたシステムでは最大許容送信電力が40.0 kWと、大容量電力伝送を可能にすることも示唆した。

第4章では、電気自動車での使用が想定されている誘導結合型WPTシステムに対し、漏洩磁界の影響を低減し、かつ伝送高効率を実現可能な複合磁性コアを用いたシステムを提案している。具体的には、同一構造の送受信コイルを用いたWPTシステムに対し、中間層に2種類の形状の複合フェライトコアを用いたWPTシステムについて数値解析を行い、その影響について議論、さらにコイル間にずれが生じた場合についても評価を行っている。結果から、コイル間のずれがない場合では、提案コア構造を用いた場合、伝送距離30 cmにおいて電力伝送効率が34% 向上することを示した。さらに、漏洩磁界が 91.6%、結果として人体内部に誘導される電界が98.3%減少できることを示した。

第5章は、第3章・第4章の研究成果を総括し、将来課題について述べている。

以上の研究成果は、IEEE Accessなど査読付原著論文3篇が公表されており、電磁界防護に関する知見、さらにはその知見の実デバイスに対する適合性評価法などへの適用と、それにより得られた結果は電波の安全性評価に関する国際ガイドラインにおいて多大な貢献をするものと認められ、その価値は学術的にも高い。

以上を総合して、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分値するものと認める。