

分割型左右 2 コイルを用いた 走行中給電システムにおける電磁界影響についての検討

藤田 稔之 永井 栄寿 Binh-Minh Nguen 山田 翔太 清水 修 藤本 博志

Study of Electromagnetic Field Effects in Dynamic Wireless Power Transfer System with Separated Double Circular Coils

Toshiyuki Fujita Sakahisa Nagai Binh-Minh Nguen Shota Yamada
Osamu Shimizu Hiroshi Fujimoto

Radio waves are managed in the world that frequencies can be used effectively and mainly in telecommunications, which are a limited resource. Since WPT transmits power in the air using electromagnetic fields a WPT system interference with telecommunications equipment and other devices. This report investigates the electromagnetic environmental effects of the DWPT system. Two types of electromagnetic field evaluations were conducted to ensure that the system does not affect other electrical equipment (Electro-Magnetic Compatibility), and the human body (Electro-Magnetic Force). The results of the EMC evaluation indicate to keep the EMC limits even when 50 kW of power is transmitted per vehicle. The maximum value of EMF estimates within the EMF reference even when 25 kW of power is transmitted per coil by placing near a wheel.

KEY WORDS: EV and HV Systems, energy control system, Wireless power transfer [A3]

1. ま え が き

電気自動車 (Electric Vehicle : EV) は優れた環境性能から大きな注目を集めている。近年、ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer : WPT) は充電作業における利便性や高い安全性などの利点が見られるため、家電製品のみならず、ドローンや自律型無人潜水機などの移動体や産業機器などの幅広いアプリケーションに応用されている^(1,2)。2007年にMITから発表された磁界共振結合⁽³⁾によるWPTは数十cm～数mの距離においても高効率に電力伝送ができ、位置ずれに強いいため、EVへの応用では停車中WPTだけでなく、走行中WPT (Dynamic WPT: DWPT) の技術開発も期待されている。EV向けWPTでは、主に85kHzの周波数が利用され、コイルを用い磁界によって電力伝送を行っている。

空間に伝達される電波は主に通信において限られた資源である周波数を有効的に使用できるように各国および全世界で管理されている⁽⁴⁾。WPTでも空間に電界や磁界を用いて電力を伝送しているため、通信機器やその他の機器との干渉が問題になることが懸念される。この課題は電磁環境両立性 (Electro-Magnetic Compatibility: EMC) と呼ばれており、各機器の利用周波数や高調波が他機器に影響を与えないように制限値が規定されている。

日本国においては、電波法や無線設備規則等において規制

が行われており電気系統への高周波ノイズ (伝導ノイズ)、空間への磁界ノイズ、電界ノイズの3種類のノイズが規制されている。EV向けWPTシステムでは伝送に利用する周波数帯である79～90kHzの磁界ノイズは総務省告示第207号第4項によって緩和されている⁽⁵⁾。本稿ではこの利用周波数帯の影響について主に検討を行う。

電磁波は機器のみならず、人体にも影響を与える可能性が懸念されている。ICNIRP2010⁽⁶⁾では、1Hzから100kHzまでの範囲の周波数を対象として、電界及び磁界 (Electro-Magnetic Force : EMF) の曝露 (以降EMFの曝露をEMFと表現する) の制限に関するガイドラインを制定している。このガイドラインでは、急性的な影響に関する実験結果に基づく制限値を設定している。また、慢性的な曝露条件では疫学および生物学的研究結果から低周波曝露と因果関係が認められる根拠や裏付けが存在しないことも記載されている。ICNIRP2010においての制限値は人体への影響に関するものであることから、人の体内に生じる電界強度で与えられる。しかしながら体内の電界強度の計測および推定は困難であるため、参考レベルと呼ばれる値を制限値の代替として用いている。参考レベルを超過した場合においても制限値を超過するとは限らないため、超過した場合においては、追加検証を行って体内に生じる電界強度等の制限値を超過しているか否かをさらなる検証において判断する必要がある。本稿においては提案するWPTシステムを車両に搭載することを想定し、ホイール近傍におい

1) 東京大学 新領域創成科学研究科
(277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

て参考レベルを超過しないことを検証した結果について報告する。

各種の標準化団体でEV向けWPTの標準化の検討が進められている^(7,8,9)。停車中WPTでは、文書SAE J2954が発行されており伝送周波数や電力・伝送距離等が規定されている。電磁界の影響についても規定がされており、前述した電波法等の制定にあたって参考になっている標準化文書であるCISPR11⁽¹⁰⁾やICNIRP2010を引用したうえで、車両に搭載したWPTシステムのEMCやEMFをどのように評価するか等が記載されている⁽⁹⁾。しかしながら、DWPTの標準規格では未だ磁界影響に対する評価方法は論議・規定されていない。そのため、本報告においては停車中WPT規格の中で最も詳しく規定しているSAE J2954規格を参考に測定方法を決定した。

本報告は、著者らが開発中のDWPTシステムにおける電磁環境影響について検証する。電磁界環境として他の電気機器に影響を与えないためのEMCおよび、人体への影響を確認するEMFの2つについて検討した。第2章にはEMCの低減手法として分割型左右2コイルを使用する。EMCは基本周波数である85kHzに焦点を当て、様々な回路方式による低減効果について検証する。第3章ではEMFの低減方法として、タイヤ横にコイルを搭載することを想定したホイール金属の遮蔽効果について検討する。遮蔽効果は1点ではなく平面上に測定を行い、磁界形状についての検討も行う。

2. EMC 評価について

2.1. 実験条件

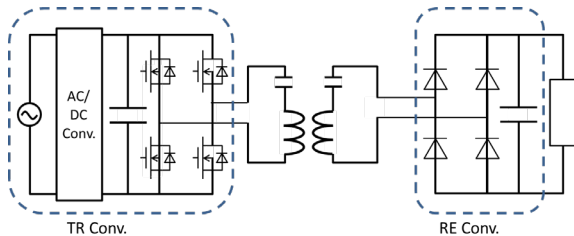


Fig. 1 SS topology WPT system for this experiment

図1に本報告で使用した基本的なWPTシステムについて示す。系統電源からAC/DCコンバータを通じて直流電圧を生成する。その後、フルブリッジインバータを通じて基本波が85kHzとなる矩形波電圧を生成する。本報告では、Series-Series方式と呼ばれる共振コンデンサを直列に接続したWPTシステムを用いる。受電側も同様に直列接続した共振コンデンサの後段にフルブリッジダイオードを用いて直流電圧を生成したのち、直流負荷を接続している。

表1に使用するコイルの仕様を示す。送電側はDWPTを想定して、進行方向に長い円形のコイルを使用している。また、軽量化のために送電コイル中央にフェライトは存在していない。また、送電コイルの地中埋込を想定して巻線間の距離は75

mmとし、地表面から車両コイルまでの距離を50mmとする。

Table I Specifications of WPT coils

Air gap	75 mm
Ground side	
Outer winding	405 x 285 mm
Width of winding	45 mm
Turn number	14 T
Outer ferrite	410 x 290 mm
Width of ferrite	50 mm
Vehicle side	
Outer winding	185 x 185 mm
Width of winding	45 mm
Turn number	14 T
Outer ferrite	200 x 200 mm

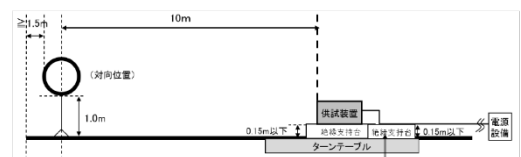


Fig. 2 Measuring method for magnetic field of EMC

図2にEMCの磁界強度の測定方法について示す⁽⁹⁾。供試装置と記載されている部分に図1に示したWPTシステムを設置する。10m遠方に設置したループアンテナを用いて利用周波数の磁界強度の計測を行う。ターンテーブルを用いて準尖頭値検波を行い、計測値の最大となる角度における値を計測値とした。



Fig.3 EV and DWPT system for EVs.

図3に本報告で提案する分割型左右2コイルのイメージ図について示す。図1に示したWPTシステム2台を車両の左右に配置することによって電力伝送能力を2倍とし、特にEMCの低減が可能となると考えている。複数のコイルを用いてEMCを低減する手法は広く研究が行われている。ソレノイドコイルを用いてEMCが最小となる配置場所の検討⁽¹¹⁾や、送受電コイル合わせて12個のコイルを用いてEMCおよびEMFが低減可能なWPTシステムの提案⁽¹²⁾受電側にキャンセルコイルを配置する手法⁽¹³⁾などが行われている。EMCの

低減量についてはコイルの形状・数等によって配置が異なる。本報告では2組の円形コイルを使用してDWPTを見越した大電力においても現在の基準以下となるような回路構成・制御方法について検討を行う。

図4にEMCの低減を行う回路構成のについて示す。低減が可能な回路構成についてはこの限りではないが、本報告においては3つの回路構成について検討を行う。図3(a)はコイルを直列に接続した方式（以降「直列方式」とする）、図3(b)はコイルを並列に接続する方式（以降「並列方式」とする）、図3(c)はインバータによって電流位相を制御する方式（以降、「制御方式」とする）である。それぞれの方式において、コイルを配置したときにコイルに流れる電流の方向が反対となるように結線を行うことでEMCが低減できる。図3(c)においては、インバータ間の電圧位相を制御することによって、0-360°まで電流位相を変更することが可能である。

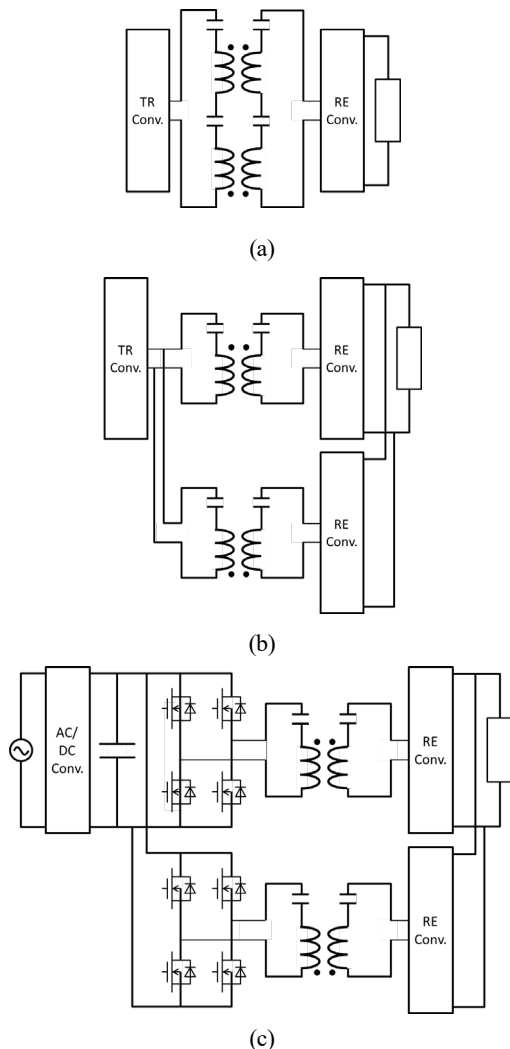


Fig. 4 Circuit configuration of a WPT system with reduced EMC
 (a) Coils connected in series (b) Coils connected in parallel (c)
 Current phase controlled by the inverters

2.2. 実験結果

図4に測定時のコイル配置図について示す。2つのコイルを用いた場合は送電側のコイル中心間の距離は670mmとして試験を行った。

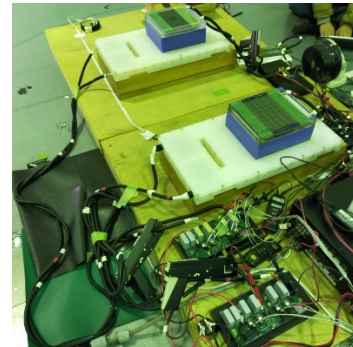


Fig. 4 Coil layout for EMC measurement

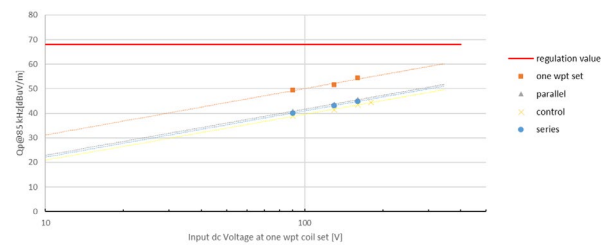


Fig. 5 EMC measurement and estimation results at 85 kHz for each topology

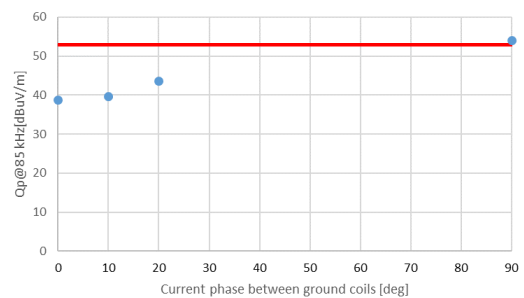


Fig.6 EMC measurement results at 85 kHz for different current phase difference between coils

図5に各回路構成における85kHzにおけるEMC測定結果を示す。それぞれの入力および出力直流電圧は同一とした。すなわち入出力のインピーダンスは各測定点において同一である。出力電力は1コイル当たり1,2,3kWとした。当初の想定通り地上側コイルの位相を反転させることによって各2コイルの回路構成によって10dB程度の低減効果が見られた。低減量としては並列方式<直列方式<制御方式となった。並列方式では、入力電圧の位相は同一であるが、共振コンデンサのずれや、WPTコイルのインダクタンスが異なることによって電流位相が異なり、電流の位相が完全に一致しなかったためと考えられる。直列方式においても同様であり、送電コイルの電流位相は反転しているが、電流値が同一となるため、車両側コイルの受電電力が不一致となっていることが原因だと考

えられる。制御方式では、電流値および位相がそれぞれの WPT コイルで独立に制御できるため、電流位相および電流値が最適値となり、EMC の低減量が最大になったと考えられる。

図 6 に制御方式において、2 つのインバータの電流位相を 0-90deg.まで変更した場合の 85 kHz における EMC の測定結果について示す。入力電力は 1kW である。電流位相が 10deg.以下であれば、EMC の大きさはほぼ変わらないが、20deg.以上であると優位に差が表れる。また、位相差が 90deg.以上となると、低減効果ではなく重ね合わせによって 1 コイルよりも大きな EMC となる。

3. EMF 評価

3.1. 実験条件

小型バスの後輪軸下に WPT システムを設置し、車両側方の磁界強度の測定し、磁界ガイドライン(ICNIRP2010)に適合するか否かの確認を行った。DWPT においては標準規格では未だ磁界影響に対する評価方法は論議・規定されていないため、停車中 WPT 規格の内、最も詳しく規定されている SAE J2954 規格を参考に測定方法を決定した。

図 7 に評価に使用した車両について示す。本システムは小型バスへの適用が検討されており三菱 FUSO ローザ車両を用いて試験を実施した。また、車両コイルは著者らが開発を行っているばね下方式を想定し、車両搭載想定位置を決定した。

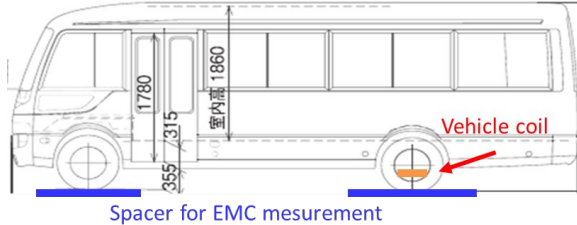


Fig. 7 Bus used in the evaluation and the position of the coils to the bus

図 8 に WPT システムの車両後輪軸周りへのレイアウトを示す。車両側端に対して地上-車両コイル中心位置の距離 650 及び 700 mm にコイルを設置した。タイヤは 205/85 R16 を使用しており、直径はおよそ 750 mm である。前後方向位置は、後輪軸直下を $x=0$ とした。地上コイルは路面内に埋設する想定で、タイヤ接地面を $z=0$ として下方 25 mm(-25 mm)の位置に地上コイルを設置した。そのため、 $(x,z)=(0,0)$ の EMC を計測するためにスペーサによって車両を持ち上げている。また、地上コイルと車両コイルは磁気中心を合わせることにし、位置ずれなしの状態で評価した。地上コイルと車両コイルは別途スペーサによって空隙を確保している。+x 方向は車両前方、+z 方向は鉛直上方とする。図 9 に示す $y=650, 700$ mm は、計測面と地上コイル中心の距離を示している。

図 9 に EMF の計測の概要図と実測の様子について示す。

SAE J2954 には、EMF の測定において車両を 3 つの領域に分けられており、車室内、車両下、車両側面である⁹⁾。そのうち、車室内および車両側面は ICNIRP ガイドラインを満たす必要がある。J2954 を踏まえて、磁界計測器を車両壁面まで近づけて計測を行った。

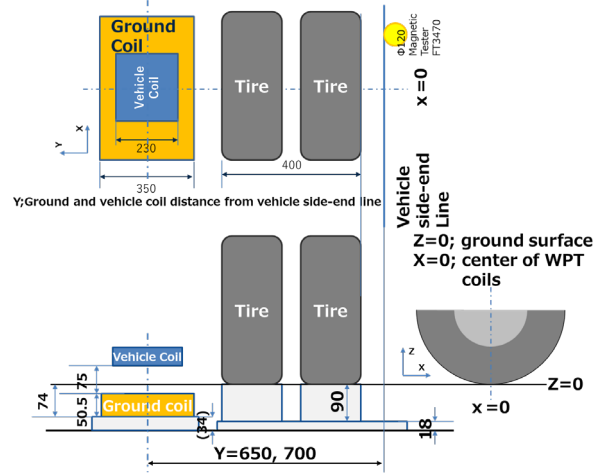


Fig. 8 Layout of the WPT system around the rear axle of the bus

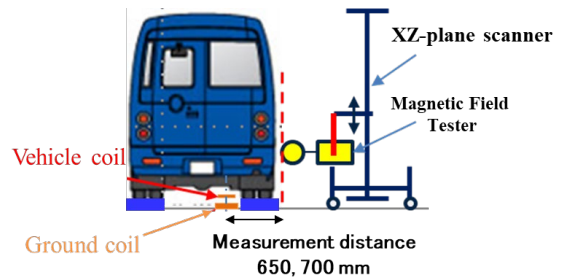


Fig. 9 Overview of EMF measurements

Table2 Measurement parameter of EMF

y	650,700 mm
Input power	1, 5 kW
x position	-500 ~ 500 mm
z position	0 ~ 1000 mm
Sweep interval	50 mm
Bus	w/, w/o, Mimic Plate

表 2 に EMC における測定条件について示す。電力を一定としたうえで、 x と z を 50 mm ずつずらして EMF を取得した。1 条件当たりの計測時間はおよそ 1 時間であった。

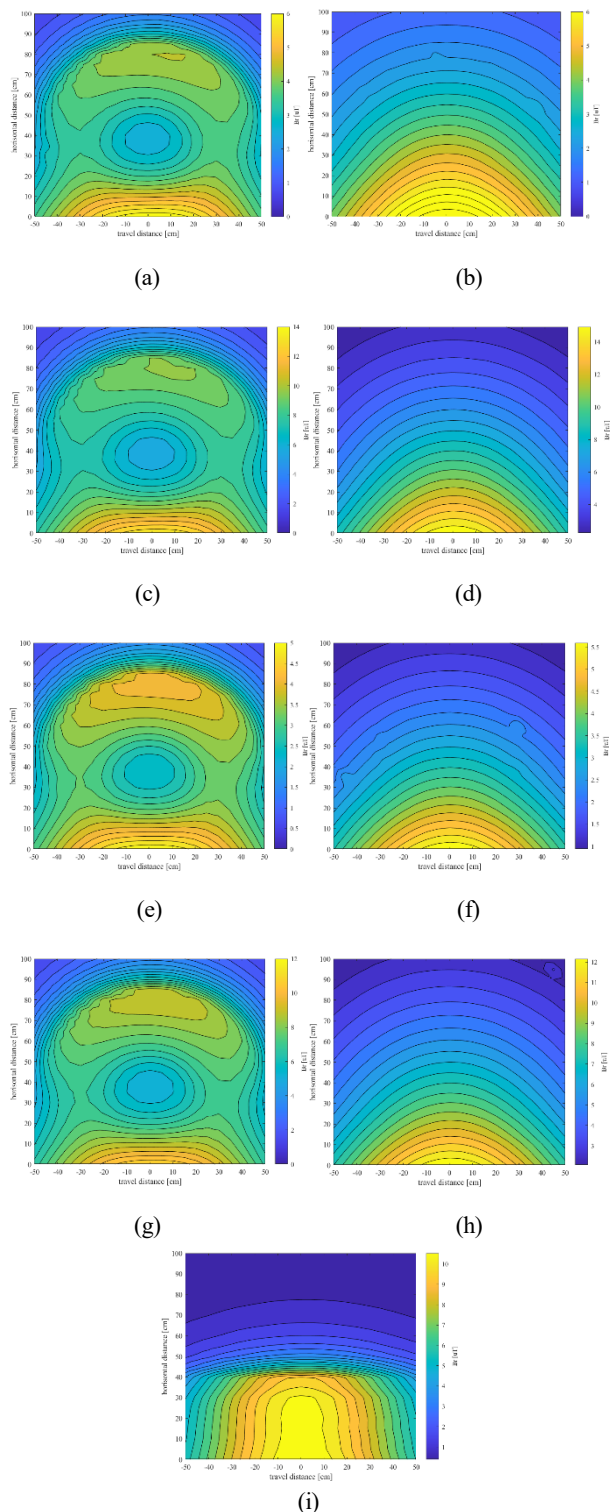


Fig. 10 EMF measurements (a), (b) W/ and w/o a bus at $y=650$ mm, $PL=1$ kW (c), (d) W/ and w/o a bus at $y=650$ mm, $PL=5$ kW (e), (f) W/ and w/o a bus at $y=700$ mm, $PL=1$ kW (g), (h) W/ and w/o a bus at $y=700$ mm, $PL=5$ kW (i) W/ and w/o a bus at $y=700$ mm, $PL=5$ kW with vehicle simulation plate at $z=400$ mm

3.2. 計測結果

図 10 に EMF の計測結果について示す。図 10(a), (c), (e), (g) に車両がある状態での計測結果、(b), (d), (f), (h) に車両がない状態での計測結果を示す。また、車両側端面からコイルまでの距離(y)および、入力電力(PL)を変えたときの計測結果を示している。車両がない状態では、発生源である送電コイルを中心として放射状に磁界が広がっていることがわかる。磁界強度の最大点はいずれの測定においても WPT コイル中心である $(x,z)=(0,0)$ が最大となった。今回はスペーサを使用することによって路面の高さの磁界を計測することが可能だったが、実際には計測プローブが $\Phi 120$ であるため、実環境において $(x,z)=(0,0)$ を計測することが難しい。また、地表面の影響も考慮する必要があるため、厳密な測定を行う場合は実施する環境での測定が必要だと考えている。

車両がある状態では、ホイール中心部の磁界が小さくなっておりホイールの金属が遮蔽物として機能していることがわかる。ホイール径は 750 mm 程度であり、車両ある状態の計測結果から直径 800 mm 近くの同心円状に磁界が小さくなっていることが見て取れる。また、タイヤ上部については、車両がない状態より磁界が大きくなっている。この現象については、詳細な解析が必要であるが、磁界の回り込みであると考えている。

図 10(i)に $z=400$ mm の位置に SAE J2954 に準拠した 1.5 角の鉄製の Mimic Plate (模擬プレート) を配置した際の EMF について示す。伝送電力は 5 kW, $y=700$ mm とした。Mimic Plate は、図 10 を考慮して測定面までとしている。図 10(h)と (i)を比較すると車両模擬プレートによって、図 10(i)では、 $z=300$ mm 近くまで磁界が大きくなっており、車両の磁界の形状が変化している。しかしながら、最大値は、模擬プレートなしと比較して小さくなっていることがわかる。模擬プレートによって計測値の低下することは確認できたが、ホイールによる磁界形状の変化とは異なる結果となった。これは、コイルがホイールに近接しているため発生する事象ではないかと考えており、模擬プレートではなく、ホイールの模擬を行う必要があると考える。

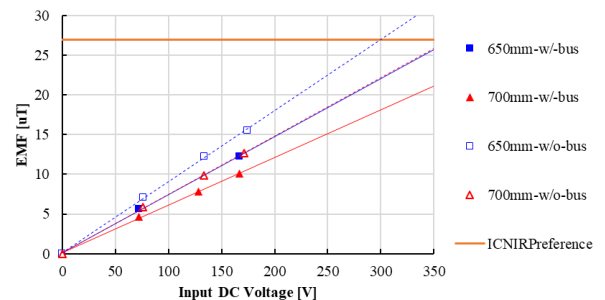


Fig. 11 Maximum EMF and their estimation results with and without vehicles

図 11 に車両の有無による EMF の最大値とその推定結果について示す。磁界は、電流に比例するため、横軸を電力ではなく、入力電圧としてプロットを行った。車両があることによっておよそ 10%程度の EMF の低減効果があることがわかる。車両なしの状態では、入力電圧 350 V すなわち 25 kW の電力伝送を行うことで EMF の参考値を超過している。車両があることによって車両側面から 650 mm の位置においても 25 kW の電力伝送を行った場合であっても ICNIRP ガイドラインの基準値である $27 \mu\text{T}$ を超過しないことが予測される。

4. まとめ

本報告では、著者らが研究開発中の DWPT システムの電磁環境影響について調査を行った。電磁界環境として他の電気機器に影響を与えないための EMC 評価および、人体への影響を確認する EMF 評価の 2 点を行った。

EMC の低減手法として 2 組の WPT コイルを使用することによる低減の可能性について検討を行った。低減の検討は、基本周波数である 85 kHz とし、実機によって確認を行った。共振のずれやコイルのインダクタンスのずれによって若干の変動はあるものの 2 組とすることによって EMC を 10dBuA/m 程度の EMC 低減が可能であることを示した。これは地上コイルの電流方向を 180° 反転させることにより、それぞれのコイルから発生する磁界を弱めあうことを示している。また、EMC の評価結果から車両一台当たり 50 kW の電力伝送時でも EMC 規制値以内に収めることが可能であると推定された。

EMF の低減方法として、ホイールの遮蔽効果の可能性について検討を行った。磁界計測には、スキャナを XZ 平面上で走査可能な測定器を用いた。実車を使用し、タイヤ近くに配置することによる近傍磁界の影響を検討した。タイヤ近傍に WPT コイルを配置することによって磁界が低下することを実験によって確認した。また、タイヤの中心へ向けて磁界が低下していくことが分かった。車両模擬プレートを配置することでも磁界が低減することが確認できたが、タイヤによる磁界低減効果とは異なるため、ホイール周辺に配置する場合はホイールを用いる必要があることが分かった。EMF の最大値からタイヤ横に配置することによって 1 コイルあたり 25kW の電力伝送時でも EMF 規制値以内に収めることが可能であると推定された。

謝 辞

本研究の一部は、JST 未来社会創造事業 (JPMJMI21E2) および、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP21005) の支援を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 西川久, 山口裕之, 西橋毅, 田中亜実, 道関隆国: UHF 帯を用いた小型移動体への無線給電システム, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.137 No.11 p.1435-1442 (2017)
- (2) 佐藤直樹, 木船弘康, 米田昇平: 水中探査機向けマルチコイル型非接触給電装置のコイル配置の検討, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.139, No.1, p.13-21 (2019)
- (3) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, : Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, science, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- (4) International Telecommunication Union: Radio Regulations, Edition 2020.
- (5) 総務省:平成 28 年総務省告示第 69 号, 2016 年 3 月 15 日.
- (6) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). Health Physics, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, (2010).
- (7) IEC 61980-1:2015 : Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems – Part 1: General requirements, International Electrotechnical Commission, Jul. 2015.
- (8) ISO/PAS 19363:2017, : Electrically propelled road vehicles - Magnetic field wireless power transfer- Safety and interoperability requirements," International Electrotechnical Commission, Jan. 2017.
- (9) SAE J2954 Task force : Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology, SAE International, Recommended Practice, Revised 2019-04.
- (10) International special committee on radio interference (CISPR): Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, CISPR 11:2015+AMD1:2016+AMD2:2019.
- (11) T. Shijo, K. Ogawa, M. Suzuki, Y. Kanekiyo, M. Ishida and S. Obayashi: EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for rapid contactless charging of electric bus, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, USA, 2016, pp. 1-6.
- (12) K. Kusaka, R. Kusui, J. Itoh, D. Sato, T. Shijo, S. Obayashi, M. Ishida: A 22kW Three-phase Wireless Power Transfer System in Compliance with CISPR 11 and ICNIRP 2010, IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 11, no. 4, pp. 594-602, 2022.
- (13) T. Kobayashi, T. Imura, Y. Hori: Proposal of a Far-Field Leakage Suppression Method Considering the Influence of Ferrite and Aluminum and Steel Plate by Cancellation Coil on Receiving Coil Side for Wireless Power Transfer in Running Electric Vehicles, Technical meeting on SPC, IEEJ, SPC-23-145, 2023.