

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14959

研究課題名（和文）漏えい磁界低減を目的とした高周波電源一体型ワイヤレス給電システムの開発

研究課題名（英文）Wireless power transfer system for radiative noise reduction with combined power supply and transmission coil

研究代表者

日下 佳祐（Kusaka, Keisuke）

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：40826202

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）：本研究では、電気自動車充電用のワイヤレス給電システムを開発した。大電力のワイヤレス給電システムでは、高周波電源から伝送コイル間の電力ケーブルから生じる漏えい磁界も無視できず、周辺機器の誤動作や無線通信障害の原因となる。そこで本研究では伝送コイルと高周波電源の一体化技術を開発した。伝送コイルと高周波電源を一体化するため、電力ケーブルには高周波電流が通流しなくなるため、ケーブルから生じる漏えい磁界を大幅に低減可能となる。22kW試作機の実証試験を行い、システムから生じる漏えい電磁界が国際的なガイドライン（CISPR 11, Class A, group 2）を満足可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

漏えい電磁界は、システム周辺の電子機器や無線通信障害の原因となりうるため、電子機器の製品化にあたって遵守しなければならない国際的な基準が定められている。ワイヤレス給電システムは原理上漏えい電磁界の発生を妨げられないため、大電力化は困難とされていた。本研究の成果により、22kWワイヤレス給電システムにおいても、漏えい電磁界に関する国際的な基準を余裕をもって満足することが実証された。

研究成果の概要（英文）：In this project, a wireless power transfer (WPT) system for electric vehicles has been developed. The high-power WPT system emits a strong magnetic field owing to its operation principle from both the transmission coils and cables between a high-frequency power supply and the transmission coils. The magnetic field emission must be reduced because the magnetic field may interfere electrical equipment and radio communication nearby the system. In order to solve the above problem, integration technology of the power supply and the transmission coils has been developed in this project. The magnetic field emission is reduced because a high-frequency current does not flow on the cable due to the integration. The electromagnetic compatibility of the 22-kW prototype had been evaluated in a 10-m anechoic chamber in Nagaoka, Niigata. The measurement results show that the prototype fully satisfies the international guidelines (CISPR 11, Class A, Group 2).

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 非接触給電 漏えい電磁界 伝送コイル インバータ CISPR ICNIRP EMC

1. 研究開始当初の背景

近年、ワイヤレス給電システムの実用化に向けた研究開発が進められている。ワイヤレス給電システムには電力伝送を担う伝送コイルの他、商用周波数から高周波(85kHz)への変換を行う高周波電源が必要となる。

コイルは防塵・防水のため密閉構造が必須であることから、コイルで生じる損失により伝送コイル内部温度が高温(160度超)となる。高温下に回路を設置すると、アレニウス則により温度10度の上昇につき電解コンデンサの寿命が半減する。そのため、従来はシステムの寿命が大幅に短くなることを懸念し、伝送コイルと高周波電源を別々に設置されていた。

しかしながら、伝送コイルと高周波電源間の電源ケーブルには85kHz及びスイッチングに伴う高周波成分を持つ電流が通流することから、電源ケーブルから漏えい磁界が生じる。漏えい磁界は周辺に設置された電子機器の誤作動や無線通信障害の原因となるため、各国で定められた漏えい磁界ガイドラインを満足するよう抑制されなければならない。

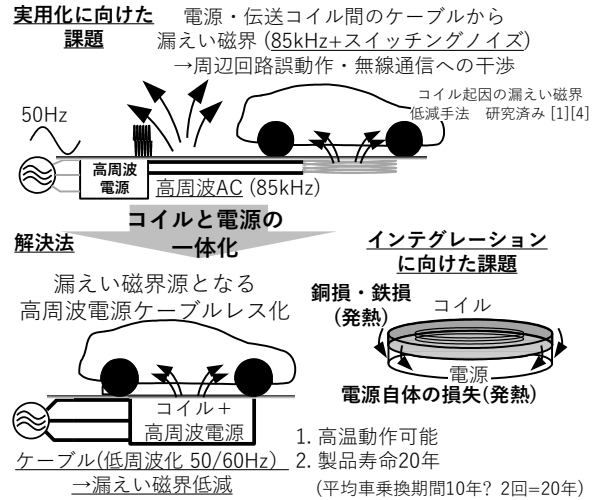


図1 本研究の背景

2. 研究の目的

本研究では、ワイヤレス給電システムの高周波電源ケーブルから生じる漏えい磁界を低減し、漏えい磁界基準値を満足するワイヤレス給電システムを実現することを目標とする。電源ケーブルに高周波(85kHz)が通流することが漏えい磁界の原因であるため、漏えい磁界の発生源である高周波電源ケーブル自体が不要となるよう、伝送コイルと高周波電源を一体化する(図2)。これにより、電源ケーブルには商用周波数成分のみが流れるため、漏えい磁界の低減が図れる。しかし、電源とコイルを一体化させたことにより回路の周辺温度の上昇は避けられず、製品化可能なレベルまでシステムの寿命を保障するためには、長寿命化に適した回路トポロジーと、高温動作可能な次世代半導体デバイスの融合が必要不可欠である。そこで本研究では、電解コンデンサが不要なため長寿命化に適したマトリックスコンバータの制御を工夫し、高周波(85kHz)動作を実現する。さらに、高温下でも20年の寿命を保障できるよう最適設計を行い、伝送コイルと一体化する。これにより高周波電源ケーブルが不要で、電磁環境への影響が小さいワイヤレス給電システムを開発する。

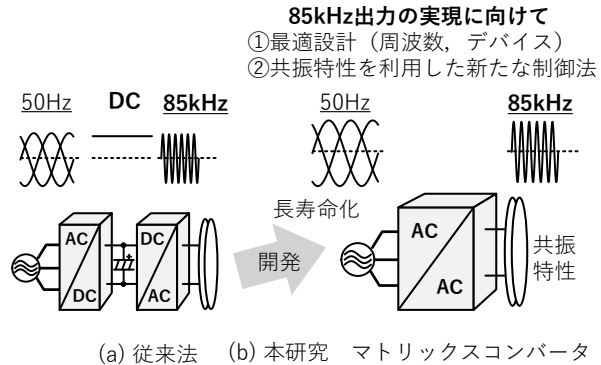


図2 開発内容：電解コンデンサレス化により高温化でも長寿命なワイヤレス給電システム

3. 研究の方法

上記の解決を図るため、長寿命化に適した回路トポロジー及び漏えい電磁界の少ない電力伝送コイル構造を開発する。これらの技術を融合することで、高周波電力ケーブルと高周波電源間の配線を排除し、漏えい磁界の発生を大幅に抑制することを目指す。

そのため、本研究は大きく2つの開発を同時並行で進行する。

A. 高周波出力マトリックスコンバータの開発 (図3左部)

B. 漏えい磁界の少ない三相12コイルワイヤレス給電システムの開発 (図3右部)

Aでは入力周波数50Hz、出力周波数85kHzのマトリックスコンバータ(交流から交流への直接形電力変換器)を開発する。本回路は直流部に電解コンデンサを有さないため、高温環境下でも長寿命化が期待できる。一方で、出力側周波数が高周波かつ共振電流となるマトリックスコンバータの制御方法は明らかにされておらず、研究開発要素となる。

Bでは伝送コイル形状の観点から、伝送コイル起因の漏えい磁界を抑制する。具体的には、同

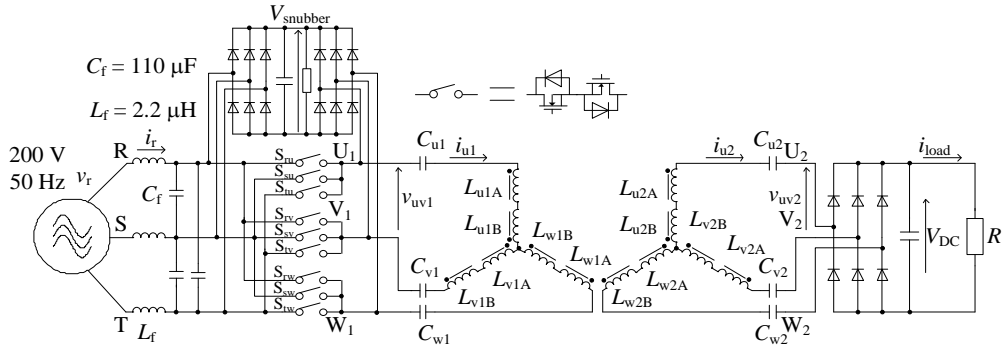


図3 高周波出力マトリックスコンバータと三相12コイルワイヤレス給電システム

じ電流が流通するソレノイド形伝送コイルを磁氣的に差動接続と成るように配置し、電力伝送を行う点に特徴がある。これにより、伝送コイルは2つの磁気双極子とみなせ、それらが逆方向ベクトルとなるため、漏えい磁界の測定点（一般的に10m）からみた漏えい磁界が打ち消される。本伝送コイルの試作器を開発し、10m電波暗室において漏えい磁界の測定を行う。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 高周波動作マトリックスコンバータの開発

図3に示す三相マトリックスコンバータの制御方法として、仮想AC-DC-AC方式を適用した。本方式は仮想整流器と仮想インバータのスイッチングパターンを個別に決定した後、行列演算によりスイッチングパターンを統合する方式である。仮想整流器には空間ベクトル変調を適用し、入力電流の正弦波化を行った。また仮想インバータには1パルス制御を適用した(図4, 図5)。これらにより決定されたスイッチングパターンを統合することで、実際の高周波出力マトリックスコンバータのスイッチング信号を得ることができる。

図6(a)にマトリックスコンバータの入力電流波形, 図6(b)に高周波部の動作波形を示す。動作波形より、提案する制御方法により入力電流の正弦波化が実現できていることを確認した。またワイヤレス給電部には高周波パルスが印加されており、85kHzの共振電流が流通していることが確認できた。

以上より、高温動作可能な高周波マトリックスコンバータの動作を実現した。

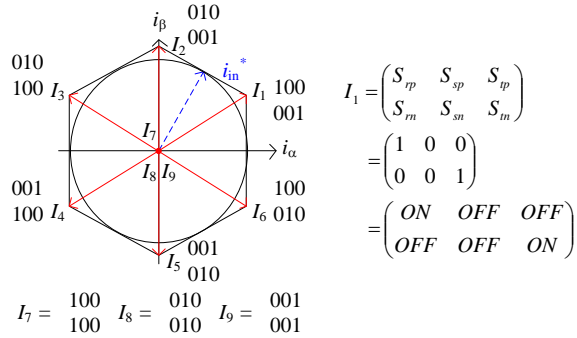


図4 仮想整流器用空間ベクトル変調

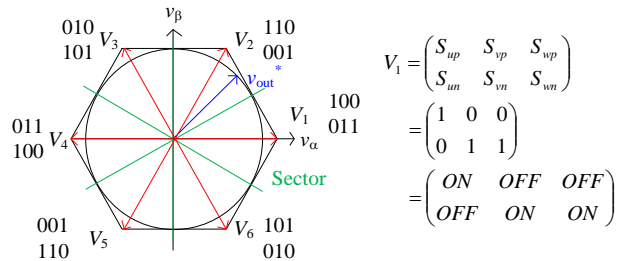
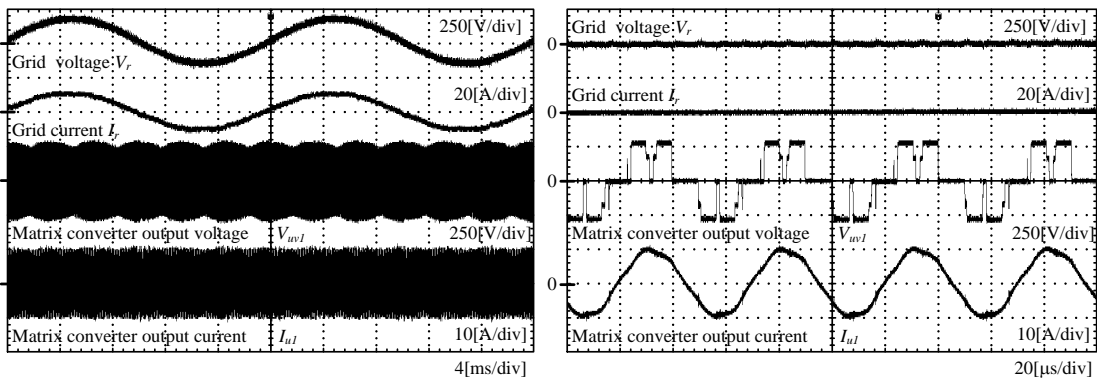


図5 仮想インバータ用空間ベクトル変調



(a) Input and output waveforms with  $T_{VCOMM} = 1.6 \mu s$  (b) Waveforms when the sector of input voltage command changes from sector five to six.

図6 高周波出力マトリックスコンバータの動作波形

#### 4. 2 漏えい磁界の少ない三相 12 コイルワイヤレス給電システムの開発

図 7 に伝送コイルの配置と接続を示す。本システムでは、同相内で直列接続された伝送コイル(例えば  $L_{uv1A}$  と  $L_{uv1B}$ ) は差動接続となるよう接続し、対向配置する。対向配置したコイルは、放射磁界の測定を行う十分遠方ではそれぞれのコイルから生じる磁束が打ち消し合うため、放射磁界の抑制が可能となる。また、各相のコイルを 120 度ずつ配置し、三相電流を通流することで、電力伝送に寄与しない不要結合に起因する誘起電圧をキャンセルする。これにより、不要結合の影響を受けない。

図 8 に 22 kW 出力時の実験波形を示す。実験結果より、インバータ出力線間電圧に対してインバータ出力電流が 30 度位相遅れとなっており、力率改善動作が設計通り得られていることを確認した。なお、出力電力 22 kW、負荷電圧 400 V の際の伝送効率は 91.1% である。

図 9 に 22 kW 伝送中の漏えい磁界測定値を示す。図中において、点線は CISPR11 クラス A グループ 2 のガイドラインを示している。ただし、9 kHz から 150 kHz に関しては未規定であるため、国内の 7.7 kW 以下のワイヤレス給電システム向けの漏えい磁界ガイドライン値を示している。また、グレーの実線は非接触給電システムの休止中に観測した測定サイトの暗ノイズである。150 kHz から 30 MHz の周波数領域に着目すると、CISPR11 クラス A グループ 2 のガイドラインを満足可能であることを確認した。一方、伝送周波数である 85 kHz 帯において、漏えい磁界ピーク値は  $73.5 \text{ dB}\mu\text{A}/\text{m}$  となり、国内の 7.7 kW 以下向けワイヤレス給電システムのガイドライン値  $68.4 \text{ dB}\mu\text{A}/\text{m}$  を超過する結果となった。ただし CISPR11 では、22 kW 以下のワイヤレス給電システムに対して 85 kHz 帯のガイドラインを  $92.8 \text{ dB}\mu\text{A}/\text{m}$  と新たに定めることが提案されており、今後改訂予定となっている<sup>(2)</sup>。改定後のガイドラインに対しては全周波数領域において CISPR11 クラス A グループ 2 を満足する見込みである。

図 10 に 30 MHz から 1 GHz 帯における漏えい電界測定結果を示す。漏えい電界についても、すべての周波数領域で CISPR11 クラス A グループ 2 のガイドラインを満足可能であることを確認した。

以上の実証結果より、高周波電源と伝送コイル一体化による漏えい磁界低減に要する要素技術を実証した。

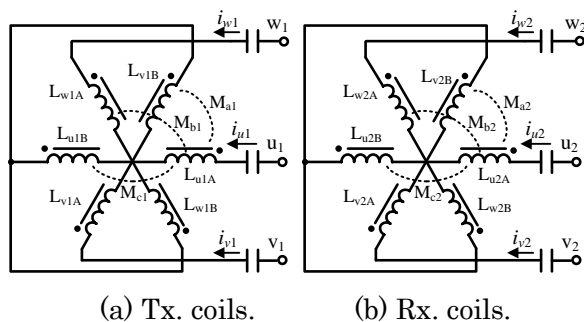


図 7 伝送コイルの配置と接続

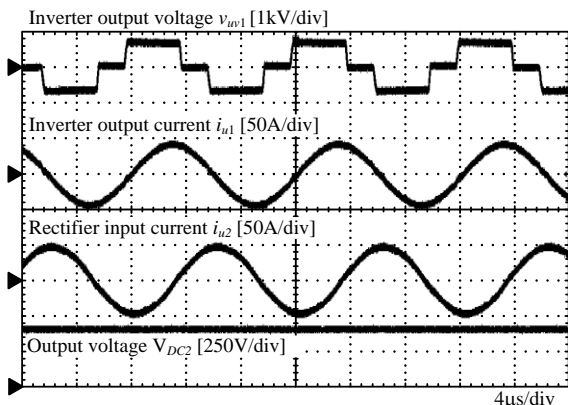


図 8 三相 12 コイル WPT システムの動作波形

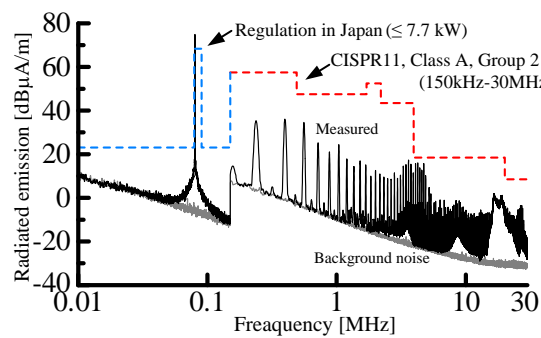


図 9 漏えい磁界測定値

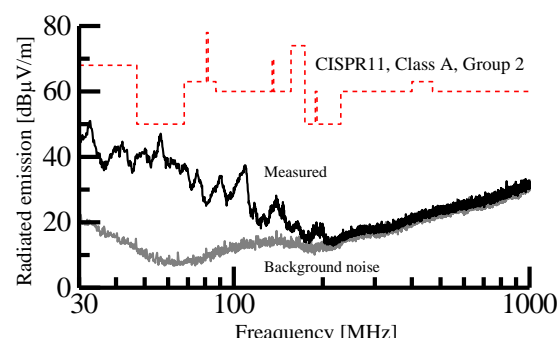


図 10 漏えい電界測定値

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 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Keisuke Kusaka, Keita Furukawa, Jun-ichi Itoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of Three-Phase Wireless Power Transfer System with Reduced Radiation Noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 660-668
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejia.8.660	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 Keisuke Kusaka, Kent Inoue, Jun-ichi Itoh	4. 巻 10
2. 論文標題 Comparative Verification of Radiation Noise Reduction Effect using Spread Spectrum for Inductive Power Transfer System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 World Electric Vehicle Journal	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/wevj10020040	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 古川啓太, 日下佳祐, 伊東淳一	4. 巻 141
2. 論文標題 漏洩磁界キャンセルコイルを用いたワイヤレス給電システムのキャンセルコイル短絡電流実効値補償に着目した漏洩磁界低減	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -
1. 著者名 Furukawa Keita, Kusaka Keisuke, Itoh Jun-ichi	4. 巻 140
2. 論文標題 Modeling of Coils for Wireless Power Transfer Systems with Reluctance Network Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 791 ~ 792
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.140.791	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 J. Itoh, K. Yamanokuchi, S. Takuma, K. Kusaka
2. 発表標題 Three-Phase Wireless Power Supply System Using Matrix Converter
3. 学会等名 European Power Electronics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kusaka, R. Kusui, J. Itoh, D. Sato, S. Obayashi, M. Ishida
2. 発表標題 A 22 kW-85 kHz Three-phase Wireless Power Transfer System with 12 coils
3. 学会等名 Energy Conversion Congress Exposition 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Itoh, M. Mizoguchi, L. H. Nam, K. Kusaka
2. 発表標題 Design Method of Cooling Structure Considering Load Fluctuation of High-power Wireless Power Transfer System
3. 学会等名 IEEE INTERNATIONAL FUTURE ENERGY ELECTRONICS CONFERENCE IFEEEC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山ノ口皓喜, 宅間春介, 日下佳祐, 伊東淳一
2. 発表標題 マトリックスコンバータを用いた三相ワイヤレス給電システム
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楠居琳太郎, 古川啓太, 日下佳祐, 伊東淳一
2. 発表標題 三相12コイル非接触給電システムのコイル配置角度変更による小型化の検討
3. 学会等名 電気関係学会北陸支部連合大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口洸輔, 日下佳祐, 伊東淳一
2. 発表標題 大容量ワイヤレス電力伝送システムの負荷変動を考慮した冷却器構造の設計法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下佳祐, 楠居琳太郎, 伊東淳一, 司城徹, 尾林秀一, 石田正明
2. 発表標題 22kW三相12コイル非接触給電システムの漏えい電磁界評価
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠居琳太郎, 日下佳祐, 伊東淳一
2. 発表標題 非接触給電システム向けフライングキャパシタ型線形増幅回路の電圧バランスの実機検証
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電子回路および無線電力伝送装置	発明者 伊東淳一, 日下佳祐, 宅間春介, 山ノ口皓 喜, 尾林秀一他1名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-143225	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------