

送受電側へのフライングキャパシタ形線形増幅回路適用による ワイヤレス給電システムの高調波漏えい磁界低減

野本 俊作 日下 佳祐（長岡技術科学大学）

A WPT system with flying-capacitor linear amplifiers
on both the primary and secondary sides for radiation noise reduction

Shunsaku Nomoto, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

Wireless power transfer (WPT) systems generate leakage magnetic fields due to their operating principle. Therefore, minimizing harmonic electromagnetic fields (EMF) is crucial to comply with standards published by CISPR. A WPT system utilizing a flying capacitor linear amplifier (FCLA) as a power supply has been proposed to mitigate radiation noise. However, this work has not considered the effect of a rectifier on the secondary side. This paper proposes a WPT system with flying-capacitor linear amplifiers on both the primary and secondary sides to reduce voltage harmonics applied to the primary and secondary coils. Experimental results show that the WPT system using 12-series FCLA prototypes decreases the third-order harmonic component of radiation noise by 15.4dB compared to the conventional WPT system with a square-wave output inverter.

キーワード：フライングキャパシタ形線形増幅回路，ワイヤレス給電，漏えい磁界

Keywords：Flying-capacitor linear amplifier, Wireless power transfer, Radiation noise

1. はじめに

ワイヤレス給電（WPT）システムでは、送電コイルと受電側コイル間が弱く磁気結合されることから、システムの周辺に漏えい磁界が放出される⁽¹⁾⁽²⁾。国際無線障害特別委員会（CISPR）は、無線通信や電気機器の誤動作を防ぐために、放射ノイズの基準レベルを公表している⁽³⁾。しかし、一般的なWPTシステムは、電源として使用されるHブリッジインバータによる矩形波電圧により、一次側コイルに高調波電流が流れ、高調波漏えい磁界を放射する。そのため、WPTシステムにおける漏えい磁界の高調波成分を抑制する手法が必要である。

WPTシステムにおける高調波漏えい磁界を抑制するために、これまでに一次、二次側電圧波形をマルチレベル化する手法や、PWMにより低次高調波を低減する手法が提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらの手法は一次側の電源、二次側の整流器から生じる電圧高調波を低減することで漏えい磁界の高調波成分を抑制している。しかし、両手法とも回路素子のスイッチング動作により高次高調波成分が生じ、漏え

い磁界の低減効果は低次高調波成分のみに限定される。

一次側電源の電圧高調波を除去し、高調波漏えい磁界を低減する手法として、筆者らはフライングキャパシタ形線形増幅回路（FCLA）を一次側に適用したWPTシステムを提案してきた⁽⁶⁾。FCLAは、B級アンプのようにMOSFETを線形動作させることで連続的な電圧を出力するため、高調波のない出力が得られる⁽⁷⁾。したがって、一次側コイルに印加される電圧に含まれる高調波成分の除去し、電流高調波を低減することができる。しかしながら、本検討では、二次側に整流器を設けておらず、整流器で生じる電圧高調波について考慮していなかった。電気自動車等のバッテリーへ給電するためには受電コイルに生じる交流電圧・電流を直流に変換する必要がある、二次側に整流器を設けなければならない。しかし、一般的なWPTシステムでは整流器としてダイオードブリッジを用いるため、整流器入力電圧波形が矩形波となる。この矩形波電圧により、コイルに高調波成分を含む電流が流通し、高調波漏えい磁界が生じる。そのため、一次側の高調波を低減するだけでは効果的に高調波漏えい磁界を低減することはできない⁽⁴⁾。

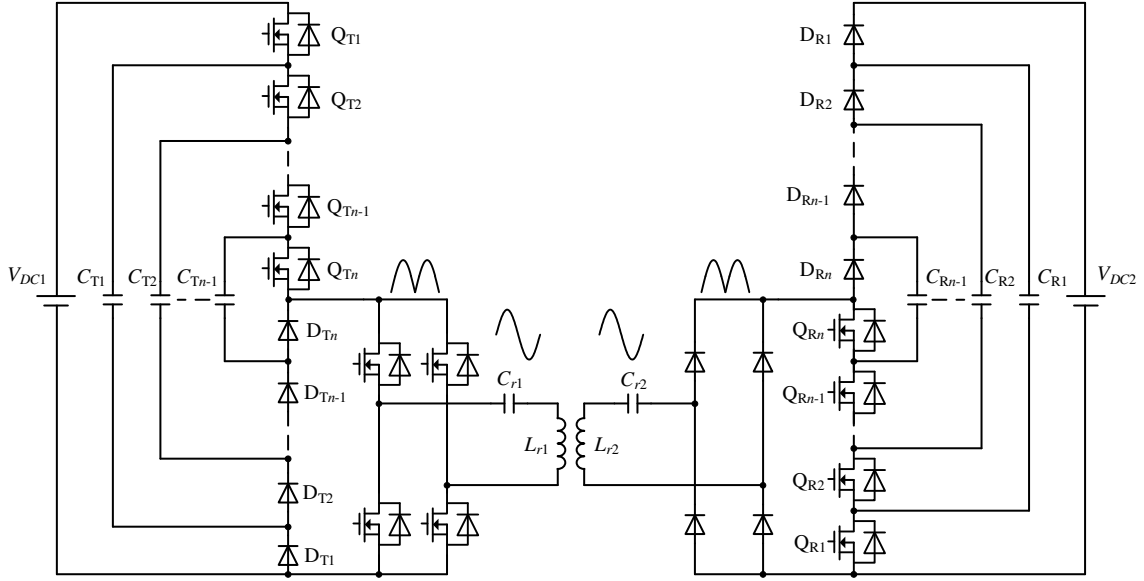


Fig. 1. A proposed WPT system with flying-capacitor linear amplifiers on the primary and secondary side.

そこで本論文では、一次側だけでなく、二次側にも FCLA を適用した WPT システムを提案する。提案システム構成によって一次、二次両側の電圧波形を正弦波とすることができるため、理論上コイルに通流する電流高調波を完全に除去することができる。したがって、WPT システムの高調波漏えい磁界の大幅な低減効果が得られる。

2. 提案するワイヤレス給電システム

〈2・1〉 システム構成 図 1 に提案する WPT システム構成を示す。本システムは送受電側にフライングキャパシタコンバータを適用したシステムと同様な回路構成となっているが、一部の MOSFET が線形動作することで連続的な正弦波電圧を送受電コイルに印加できる特徴を持つ⁽⁴⁾。一次側電源および二次側整流器として用いる FCLA は n 個の n 型 MOSFET とダイオード、 $n-1$ 個のフライングキャパシタ、極性切り替え回路および共振コンデンサ、送受電コイルにより構成される。極性切り替え回路は FCLA 出力の全波整流状電圧の極性を切り替え、正弦波電圧を出力する。したがって、送受電コイルに通流する電流高調波および高調波漏えい磁界の大幅な低減効果が期待できる。

〈2・2〉 回路動作 図 2 に提案システムの動作モードを示す。ここでは、簡単のために 2 つの MOSFET を直列に接続した 2 段 FCLA を WPT システムに適用した場合を示す。一般的な電力変換器と異なり、FCLA では図 2 に示すように直列接続した MOSFET のうち一つを線形動作させることにより、電圧高調波を含まない出力を得ることができる。一般的に MOSFET を線形動作させた場合、導通損失は印加されるドレインソース(D-S)電圧と通流電流の積となるため低効率となる。しかし、FCLA を構成するフライングキャパシタと MOSFET の段数増加により、線形動作する MOSFET の D-S 電圧を低減させることができ、変換効率が改善される。

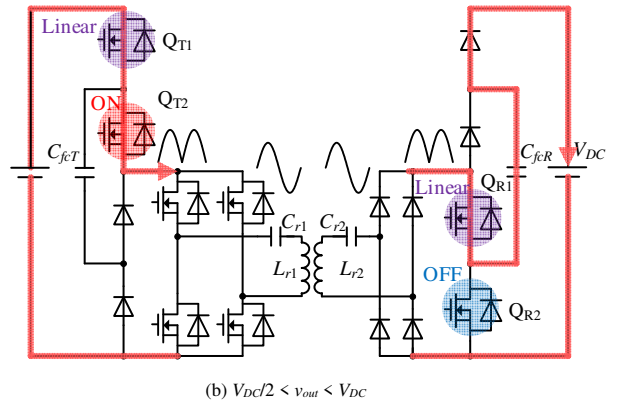
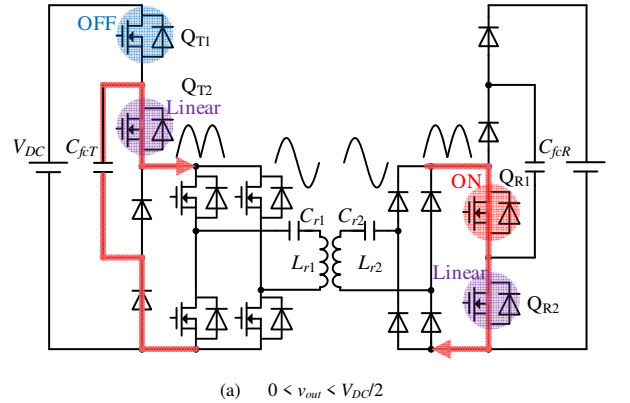


Fig. 2. Operation examples of the proposed WPT system with 2-stage flying-capacitor linear amplifiers.

3. 実験結果

表 1 に実験条件を示す。本論文では、WPT システムの電圧波形を一次、二次両側とも矩形波とした場合、一次側のみ正弦波とした場合、両側とも正弦波とした場合で電圧・

電流および漏えい磁界の高調波成分の比較を行う。ここで、矩形波電圧と正弦波電圧の基本波成分を等しくし、各方式での伝送電力をそろえるために直流電圧値を異なる値に設定している。また、本論文で検討する S/S 方式の WPT システムでは、共振時、二次側電圧・電流波形が一次側よりも 90° 進む⁽⁵⁾。そのため、FCLA を二次側に適用し、二次側電圧波形を正弦波とする場合、一次側 FCLA の指令値よりも二次側 FCLA の指令値を 90° 進ませる必要がある。本実験では、原理検証のため、一次、二次側で同じコントローラを使用し、一次、二次間の電圧位相差が 90° となるように指令値を生成した。

〈3・1〉 動作波形 図 3 に従来システムと提案システムの動作波形を示す。図 3(a)は一次、二次側電圧波形が矩形波の場合、(b)は一次側のみ正弦波の場合、(c)は両側電圧波形が正弦波の場合の動作波形である。両側に FCLA を適用したシステムは一次、二次側コイルに印加される電圧が正弦波となっており、他のシステムと比較してひずみのない正弦波電流をコイルに流せている。したがって、電圧・電流高調波および高調波漏えい磁界の低減効果が期待できる。送受電両側に FCLA を適用したときの二次側の電圧波形のゼロクロス付近がひずんでいるが、これは送受電間の電圧の位相差が精確に 90° となっておらず、二次側 FCLA の動作がずれたためである。

〈3・2〉 電圧・電流高調波解析 図 4 に一次、二次側電圧・電流の高調波解析結果を示す。電圧・電流の高調波成分は基本波の 34 周期分を測定した結果より解析した。

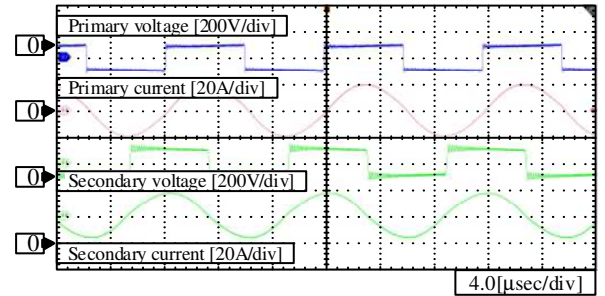
図 4(a), (b)より、従来の矩形波電圧で電力伝送したときと比較して FCLA を適用した場合は電圧の奇数次高調波成分を大幅に低減できることが確認できる。特に、一次、二次両側に FCLA を適用したシステムは矩形波電圧を印加するシステムに対して一次側電圧 3 次高調波成分を 92.7%、二次側を 87.5%低減している。また、一次側のみ FCLA を適用した場合、二次側電圧波形は矩形波のままであるので、二次側電圧は矩形波で電力伝送した場合とほぼ等しい高調波成分を含む。両側に FCLA を適用したシステムの偶数次電圧高調波は、二次側電圧波形のゼロクロス付近のひずみによるものである。

図 4 (c), (d)より、電流高調波も同様に従来の矩形波電圧で電力伝送したときと比較して FCLA を適用した場合は電圧の奇数次高調波成分を大幅に低減できることが確認できる。特に、一次、二次両側に FCLA を適用したシステムは矩形波電圧を印加するシステムに対して一次側電流 3 次高調波成分を 95.6%、二次側を 80.0%低減している。一次側のみ FCLA を適用した場合の一次側奇数次高調波成分が両側に FCLA を適用した場合と比較して一部増大している。これは、二次側矩形波電圧に含まれる奇数次高調波が磁気的な結合により、一次側にも影響を及ぼすからである⁽⁴⁾。

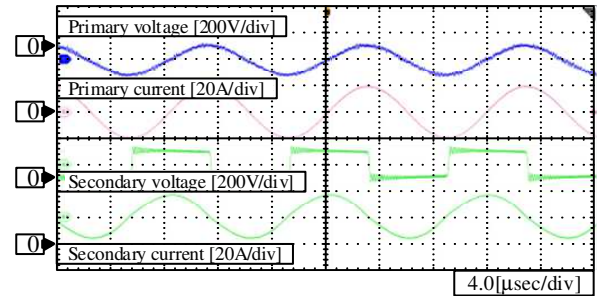
〈3・3〉 漏えい磁界の評価 図 5 に WPT システムから放射される漏えい磁界を測定した結果を示す。ここでは、送受電コイル間の中心から 1 m 離れた位置にループアンテナ

Table 1. Experimental conditions.

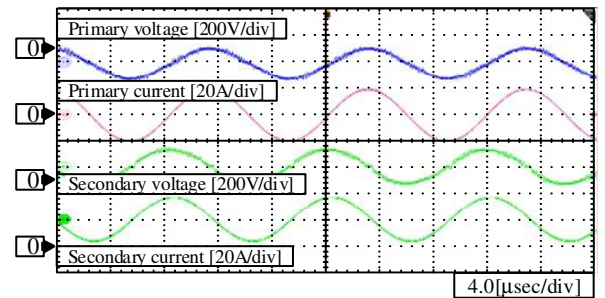
Parameters	Symbol	Value
Input or output DC voltage	V_{DC1}	Square: 94 V
	V_{DC2}	Sin: 120V
Output power	P_{out}	1.0 kW
Operation frequency	f	85 kHz
Capacitance of flying capacitors	-	20 μ F
Inductance of WPT coils	L_{r1}, L_{r2}	64.4 μ H
Capacitance resonant capacitors	C_{r1}, C_{r2}	54.4 nF
Coupling coefficient	k	0.187
Number of MOSFETs	n	12



(a) Square – Square



(b) Sin – Square

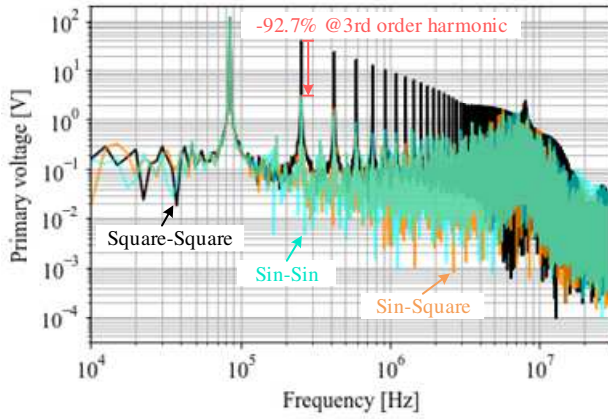


(c) Sin - Sin

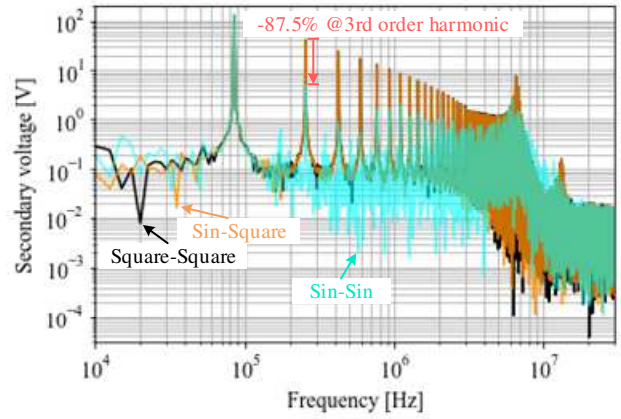
Fig. 3. Operational waveforms of WPT systems.

ナ (EM-6992, 6 cm H-field) を配置し、測定を行った。

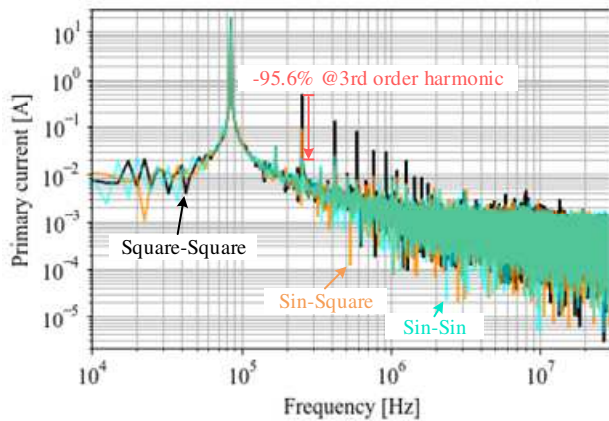
図 5 より、一次側のみ FCLA を適用したシステムでは矩形波電圧で電力伝送する場合と比較して漏えい磁界の奇数次高調波成分をほとんど低減できないことが確認できる。一方で一次、二次両側に FCLA を適用したシステムは奇数次高調波を大幅に低減できている。特に、3 次高調波は 15.4 dB, 5 次高調波は 36.5 dB, 7 次高調波は 29.5 dB 低減している。



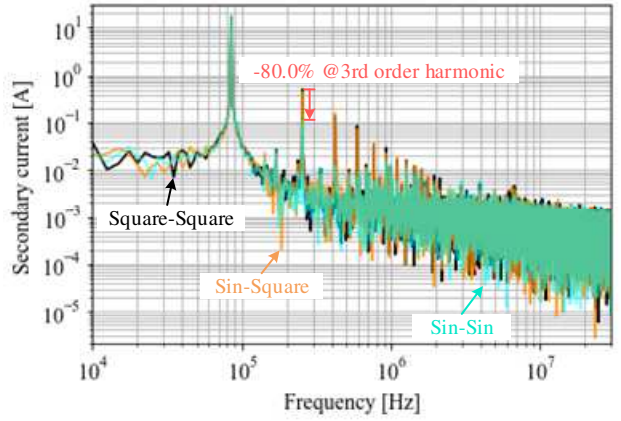
(a) Primary voltage



(b) Secondary voltage



(c) Primary current



(d) Secondary current

Fig. 4. Harmonic analysis.

較して漏えい磁界の奇数次高調波成分を大幅に低減することを確認した。特に3次高調波を15.4 dB低減した。

文 献

- (1) X. Zan and A. -T. Avestruz : "Field Cancellation for Circuits Encircled by VHF Wireless Power Transfer Coils," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 38, No. 1, pp. 46-52 (2023)
- (2) C. Lee, S. Woo, Y. Shin, J. Rhee, J. Moon and S. Ahn : "EMI Reduction Method for Wireless Power Transfer Systems with High Power Transfer Efficiency Using Frequency Split Phenomena," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 64, No. 5, pp. 1683-1693 (2022)
- (3) International special committee on radio interference (CISPR 11), Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement (2019)
- (4) 楠居琳太郎, 日下佳祐, 伊東淳一 : 「送受電側にフライングキャパシタコンバータを用いた非接触給電システムの実機検証」, 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, SPC-23-148 (2023)
- (5) 永井栄寿, 藤田稔之, 角谷勇人, 清水修, 藤本博志 : 「高速スイッチング技術を利用した磁界共振型非接触給電の低次高調波における漏洩磁界低減」, 電気学会論文誌 D, Vol. 142, No. 5, pp. 385-392 (2022)
- (6) 野本俊作, 日下佳祐 : 「フライングキャパシタ形線形増幅回路を適用したワイヤレス給電システムの漏えい磁界評価」, 令和 7 年電気学会全国大会, 4-106, pp. 172-173 (2025)
- (7) H. Obara and K. Matsushima, "A Study on Flying Capacitor Linear Amplifier Configured by Only N-channel MOSFETs," 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), pp. 1-5 (2021)

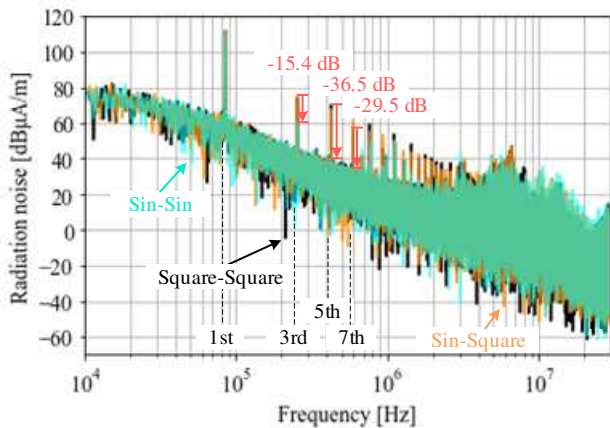


Fig. 5. Radiation noise.

4. まとめ

本論文では, WPT システムにおける漏えい磁界の高調波成分を低減する手法として, 一次および二次両側に FCLA を適用したシステム構成を提案した。FCLA は MOSFET を線形動作させることにより, 連続的な正弦波電圧を送受電コイルに印加することができる。そのため, コイルに通流する電流高調波を除去し, 高調波漏えい磁界の低減が達成できる。実験結果より, 提案システムは従来システムと比