

非接触給電システム用フライングキャパシタ型線形増幅回路 に適用可能な高周波ゲート駆動回路の開発

学生員 楠居 琳太郎 正員 日下 佳祐 上級会員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Development of a High-Frequency GDU for Wireless Power Transfer System with FCLA

Rintaro Kusui, Student Member, Keisuke Kusaka, Member, Jun-ichi Itoh, Senior-member,

This paper proposes a high-frequency gate driver unit (GDU) for a flying capacitor linear amplifier (FCLA) for a wireless power transfer (WPT) system. The conventional configuration of the controller and GDU has an isolation amplifier with a time delay in the closed-loop of the proportional controller. Since the time delay causes an unstable, the frequency band of the controller is limited. In the proposed configuration, the output voltage is controlled by the proportional controller in each GDU. The output voltage command is input to GDU from isolation amplifier at outer of close-loop of the control system. Due to this, the time delay is removed from the closed-loop. Thus, it allows the controller to be operated at a high frequency. The proposed configuration is tested with a class-A amplifier. From the results, it is confirmed that the proposed system operates at 85 kHz, which is the fundamental frequency of WPT.

キーワード：ゲート駆動回路, 線形増幅回路, フライングキャパシタ, 非接触給電システム

Keywords : Gate drive unit, Linear amplifier, Flying-capacitor, Wireless power transfer

1. はじめに

近年、電気自動車の普及拡大を目的として、非接触給電(WPT)システムが注目されている⁽¹⁻³⁾。WPTシステムにより充電ケーブルの接続が不要となるため、ユーザの利便性が向上する期待がある。しかしながら、WPTシステムは2つのコイル間の弱い磁気結合を用いて電力を伝送するため、原理上WPTシステムの周辺に漏えい磁界が生じる問題がある。漏えい磁界は他の電子機器の誤動作や、無線通信妨害の原因となるため、国際無線障害特別委員会(CISPR)などの定めるガイドラインを満足する必要がある⁽⁴⁾。特に近年、CISPR 11により規定されるWPTシステムに対する漏えい磁界ガイドラインの厳格化が検討されている⁽⁵⁾。具体的には、WPTシステムの低次高調波成分にあたる150 kHz ~ 30 MHzにおいて30dB程度引き下げられる見込みである。このため、従来の漏えい磁界抑制手法に加えて、さらなる漏えい磁界の低減手法が必要とされる。

これまで報告されているWPTシステムの多くでは、方形波電圧を出力するインバータが電源として採用されている⁽⁶⁾。低次高調波成分を有する高周波電圧が共振回路及び伝送コイルに印加されることにより、伝送コイルには低次高調波成分を含む電流が通流する。これにより、基本波成分のみならず低次高調波においても伝送コイル周辺に漏えい磁界

が生じる。加えて、インバータのスイッチングによる電圧の急峻な変化に起因し、漏えい磁界の高次高調波成分も同様に発生する。

これらの問題に対して、筆者らはフライングキャパシタ型線形増幅回路(FCLA)⁽⁷⁻⁸⁾をWPTシステムの一次側電源として適用するべく、高周波出力可能なFCLAの開発を進めてきた⁽⁹⁻¹⁰⁾。FCLAはMOSFETを飽和領域で使用することで連続的な正弦波電圧を出力するため、WPTシステムにおける漏えい磁界高調波を大幅に低減することが可能となる。しかしながら、FCLAはフライングキャパシタ(FC)電圧をバランスさせるため、各MOSFETに対してソース電位基準で所望のゲート電圧を与える必要がある。このとき、コントローラとゲートドライバ間に絶縁及びD/Aコンバータ(DAC)、A/Dコンバータ(ADC)が必要となり、無駄時間が生じる。この無駄時間は制御系に対して直列に挿入されることとなるため、高周波電圧を出力する際の不安定化を招く。これにより、高周波出力を必要とするWPTシステムへFCLAを適用することは困難である。

そこで本論文では、無駄時間要素を制御の閉ループから除去できる、新たな制御器構成とゲート駆動回路(GDU)を提案する。本構成の制御器をA級線形増幅回路に適用し、制御器からの絶縁を確保しつつ85kHzにおける増幅動作が可能であることを実験により検証確認したので、報告する。

2. WPT システム向け FCLA

(2.1) 回路構成

図 1 に WPT システム向け FCLA の構成を示す。WPT システム向け FCLA は n 個の n-MOSFET と n 個のダイオードで構成された n 直列 FCLA と極性切り替え回路で構成される。FCLA は n 個の MOSFET のうち 1 つの MOSFET を飽和領域で動作させることで、高速なスイッチングを用いずに任意の電圧を出力できる。本システムでは、FCLA により全波整流電圧を出力し、極性切り替え回路によって伝送コイルに正弦波電圧を印加する。これにより、従来の方形波を出力するインバータに比べ、出力電圧の低次高調波を大幅に低減可能である⁽¹⁰⁾。また、FCLA は出力電圧が連続的に変化するため、スイッチングに起因する漏えい磁界の高次高調波も低減可能である。

なお、FCLA は異なる電圧を保持する $n-1$ 個のフライングキャパシタ(FC)を有しており、これらの電圧バランスを維持する必要がある。FC 電圧をバランスさせるため、各 MOSFET に接続された GDU により各 MOSFET のゲート電圧をそれぞれのソース電圧基準で与えることで動作点を制御する。

(2.2) 制御器構成

図 2 に MOSFET の動作領域を示す。インバータではドレイン-ソース電圧の小さい線形領域と、電流が通流しない遮断領域のみを使用する。一方、FCLA はゲート電圧により、出力電流や電圧を連続的に制御可能な飽和領域も使用し、出力電圧を連続的に制御する。MOSFET を飽和領域で利用するためにはゲートに出力電圧、電流に応じたアナログ電圧を入力する。

図 3 に FCLA の出力電圧と動作領域を制御する制御器のブロック図を示す。FCLA の出力電圧は比例制御器によって制御する⁽¹⁰⁾。出力電圧制御器はゲート-ソース電圧指令値を出力し、MOSFET の動作領域を制御するためのオフセットを加える。FCLA の電流経路は MOSFET の動作領域により決定するため、適切に選択することで FC 電圧はバランスする。本システムでは FC 電圧バランスのために、従来のフライングキャパシタコンバータにも用いられる位相シフトキャリア比較により各 MOSFET の動作領域を選択する。MOSFET に接続される GDU は選択されたそれぞれの動作領域に応じて、オフセットの加わったゲート-ソース電圧を各 MOSFET のゲートに入力する。

図 4 に 4 直列 FCLA のシミュレーション動作波形を示す。図 4 は入力電圧指令、各 MOSFET のソース電圧を示している。FCLA は出力電圧と動作領域を制御するために、各 MOSFET に動作領域を制御するオフセットが加わったゲート-ソース電圧を入力する GDU が必要となる。それぞれ GDU は MOSFET のソース電圧を基準に動作する。図 4 より、MOSFET のソース電圧は出力電圧と電流経路によって一出力周期中に大きく変動していることが確認できる。このため、GDU と制御コントローラ間には絶縁が必要となる。

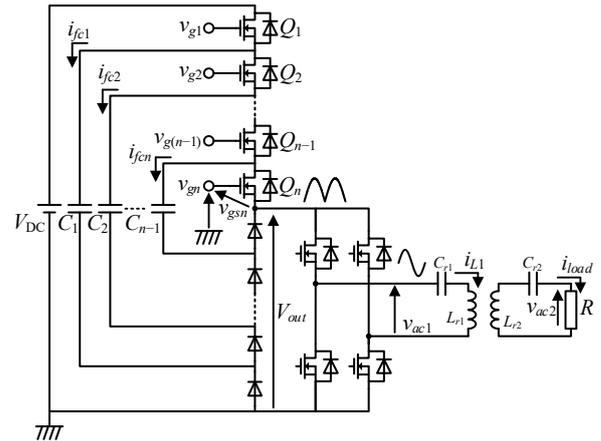


Fig. 1. FCAL for WPT system.

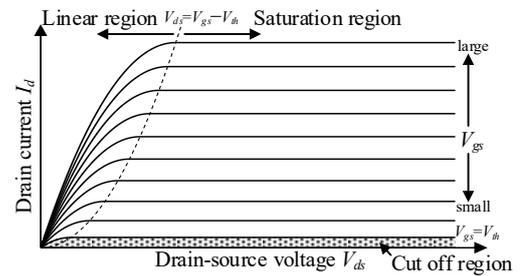


Fig. 2. Operation region of n-MOSFET.

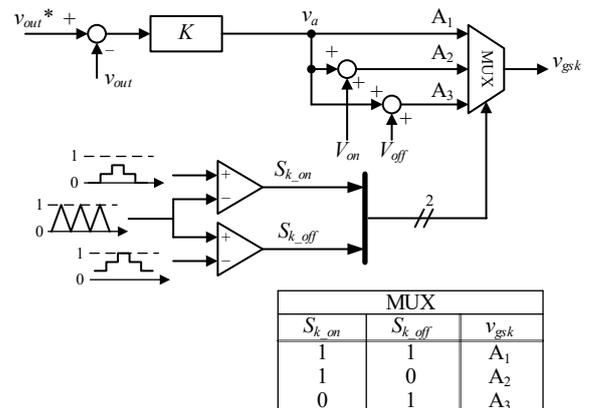


Fig. 3. Block diagram of output voltage controller.

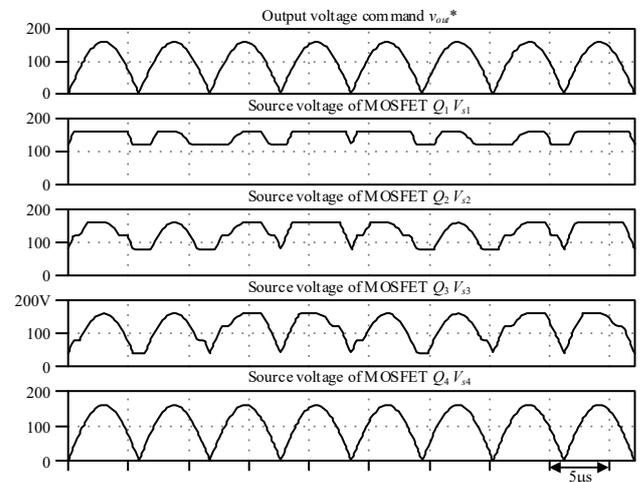


Fig. 4. Simulation waveform for 4-series FCLA.

加えて、WPT システムは 20 kHz や 85 kHz といった比較的高周波で駆動されるため、WPT システム用電源として用いるためには、これらの周波数を基本波周波数とした全波整流波形を出力できる十分な高い制御帯域が必要となる。

図 5(a)に従来の FCLA の制御器と GDU の構成を示す。従来の構成では、出力電圧を絶縁して検出した後、アナログ回路により出力電圧と比較しゲート-ソース電圧指令を生成する。各 GDU は絶縁アンプを通して、選択された動作領域に従ってオフセットの乗せられたゲート-ソース電圧を MOSFET に入力する。ここで、電圧の検出及び、ゲート-ソース電圧の絶縁にはアナログ絶縁アンプが用いられることとなるが、絶縁アンプは無駄時間を有している。したがって従来構成では、比例制御系の閉ループ内にアンプ 2 段分の無駄時間が直列に挿入されることとなる。この無駄時間は制御系の不安定を招くため、従来構成では FCLA の広帯域化が困難となる。

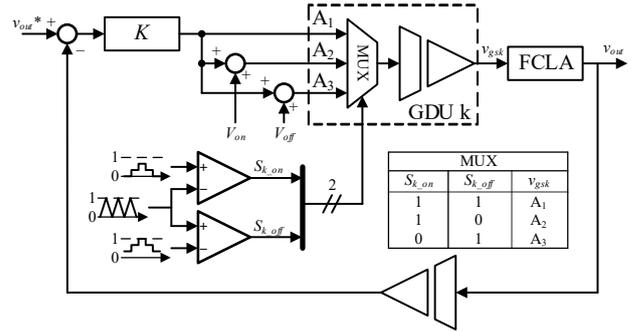
図 5(b)に提案する制御器と GDU の構成を示す。提案構成では、制御コントローラは出力電圧指令の生成と位相シフトキャリア比較に基づく動作領域の選択のみを行う。コントローラで生成した指令値を絶縁アンプを介して各 GDU に入力する。GDU は比例制御器を有しており、各 GDU において出力電圧を検出し、出力電圧を制御するゲートソース電圧指令を生成する。さらに、アイソレータから入力された動作領域の選択信号に応じてオフセットを加え、ゲート-ソースに入力する。本構成により、制御コントローラとの絶縁が出力電圧指令の入力部のみ行われるため、比例制御器の閉ループ内にむだ時間が含まれない。したがって、WPT システムで必要となる高周波帯域まで適用することが可能である。

3. 動作検証

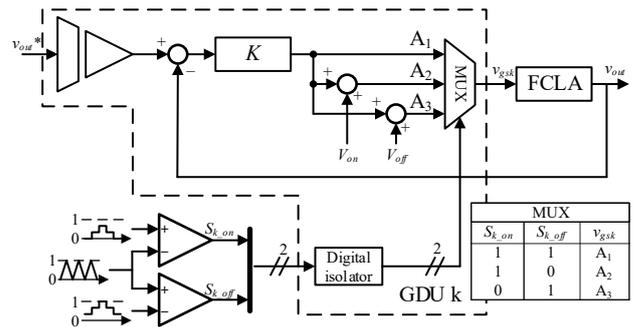
図 6 に GDU の動作試験回路を示す。また、試験条件を表 1 に示す。FCLA はドレイン接地の線形増幅回路をベースとした回路であるため、GDU の動作試験はドレイン接地方式の A 級増幅回路を用いて行う。使用する MOSFET は入手性や FCLA に適用した際の効率などの観点から 60 V 耐圧かつ低オン抵抗の MOSFET とした。試験回路の入力信号は直流バイアスの加えた、振幅 120 mV の正弦波電圧である。また、直流電圧は 40 V をとし、負荷は 40 Ω の抵抗を接続した。

図 7 に試験回路の絶縁後の指令値電圧、出力電圧、ゲート-ソース電圧を示す。なお、試験周波数は WPT システムで広く用いられる 85 kHz とした。図 7 より、出力電圧が指令値と同じ直流バイアスの加わった正弦波であることがわかる。提案する GDU によって MOSFET が飽和領域で動作し、指令値に追従していることが確認できる。したがって、提案構成を適用した GDU がコントローラと絶縁しつつ、高周波電圧出力が可能であることを確認した。

次に、85kHz を基本波とした全波整流電圧の出力に向け、開発した GDU の周波数特性を評価した。図 8 に試験回路の電圧利得の周波数特性を示す。本測定では、直流バイアスを



(a) Conventional configuration with two isolation amplifiers in close-loop



(b) Proposed configuration without isolation amplifiers in close-loop

Fig. 5. Controller and GDU configuration for FCLA.

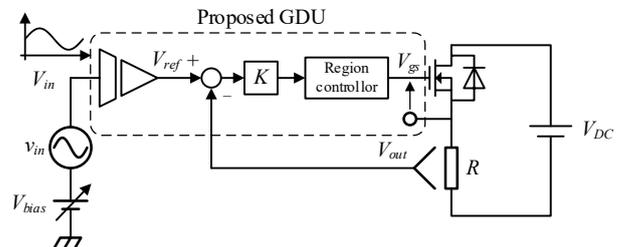


Fig. 6. Class-A amplifier for GDU test.

Table I Specification of test circuit.

Parameters	Symbol	Value
DC voltage	V_{DC}	40 V
Isolation amp. input voltage	v_{in}	120 mVpp
Load resistance	R	40 Ω
Gate resistance	R_g	75 Ω
MOSFET		IXFH220N06T3, IXYS
Operational amplifiers		AD8003, Analog Devices THS3001, Texas Instruments
Isolated amplifiers		Si8920, Silicon Labs
Digital isolators		ADuM120N, Analog Devices

除去した交流成分を測定した。図 8 は GDU の入力指令値電圧 v_{in} と試験回路出力電圧 v_{out} の利得、絶縁アンプ段の出力電圧 v_{ref} と試験回路出力電圧 v_{out} の利得、そして、GDU の入力指令値電圧 v_{in} と絶縁アンプ段の出力電圧 v_{ref} の利得をそ

れぞれ示している。ここで、小文字で示した値は、直流バイアスを除外した、交流成分を示す。また、図 8 において、それぞれの結果は 10kHz での利得を基に基準化している。使用した絶縁アンプの帯域が 950 kHz であることから、測定は 800 kHz までおこなった。図 9 から、入力指令値電圧 v_{in} と出力電圧 v_{out} の利得と入力指令値電圧 v_{in} と絶縁アンプ段の出力電圧 v_{ref} の利得が約 200 kHz から低下していることが確認できる。一方で、絶縁アンプ後段の電圧 v_{ref} と試験回路出力電圧 v_{out} の利得は絶縁アンプを含む利得と比べ高周波においても変化が小さいことがわかる。これらの結果から、試作した試験回路において絶縁アンプが周波数帯域を最も制限していることが明らかとなった。絶縁アンプ段の見直しにより、さらなる高周波出力への対応が可能となる。

4. まとめ

本論文では、WPT システム用 FCLA に適用する出力電圧制御器と GDU を開発した。FCLA は出力電圧制御と FC 電圧バランスを達成するため、MOSFET のソース電圧基準でアナログ電圧をゲートに印加する必要がある。従来の制御器構成では、制御器の絶縁部に起因したむだ時間によって広帯域化が困難であった。そこで本稿では、GDU 内で出力電圧制御を行うことで制御系の閉ループから無駄時間を含まない、高周波帯域においても適用可能な制御器構成を提案し、A 級線形増幅回路によって試験を行った。試験結果から、提案構成を適用することで WPT の基本波周波数である 85kHz における動作が可能であることを確認した。また、試作回路の周波数特性を測定し、制御器に接続される入力段のアナログ絶縁アンプがボトルネックとなっていることが明らかとなった。

今後は、アナログ絶縁アンプを用いた制御器との絶縁についても構成を見直し、85kHz を基本波とした全波整流波形を出力できるよう、さらなる制御器の高周波化を図る予定である。また、開発した制御器を FCLA に適用し、85 kHz における WPT の実証試験を実施する。

文 献

- (1) Keita Furukawa, Keisuke Kusaka, Jun-ichi: "EMF Reduction with Compensated Current RMS Based on Short Canceling Coils for Wireless Power Transfer Systems", IEEJ Trans. on Industry Applications, Vol. 141, No. 5, pp. 405-415 (2021) (in Japanese)
古川 啓太, 日下 佳祐, 伊東 淳一: 「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」, 電気学会論文誌 D, Vol. 141, No. 5, pp.405-5014 (2021)
- (2) T. Diekhans and R. W. De Doncker: "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6320-6328 (2015)
- (3) A. Tejada, S. Kim, F. Y. Lin, G. A. Covic and J. T. Boys: "A Hybrid Solenoid Coupler for Wireless Charging Applications," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5632-5645 (2019)
- (4) Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan, "Inquiry of technical requirements for wireless power transfer system for EVs in technical requirements for wireless power transfer system in standards of

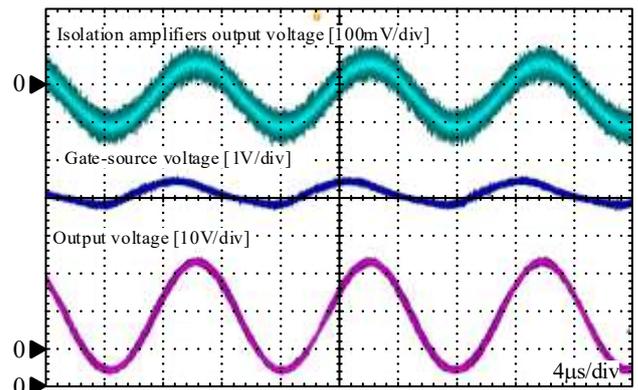


Fig. 7. Operation waveform of class-A amplifier with proposed controller and GDU.

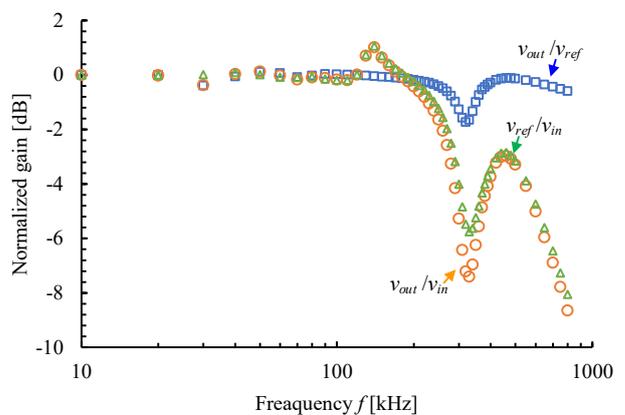


Fig. 8. Controller and GDU configuration without isolation in close-loop.

- (5) International Special Committee on Radio Interference (CISPR)", (2015)
三沢 宣貴: 「CISPR での不要輻射許容値の国際検討状況」, 自動車技術会 2019 年春季大会フォーラム EV への給電システムの最新動向, No. 20194438, pp.15-20 (2019)
- (6) Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh: "Development Trend of Inductive Power Transfer Systems with Focus on Transmission Frequency and Transmission Power", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 137, No. 5, pp. 445-457 (2017) (in Japanese)
日下佳祐, 伊東淳一: 「伝送周波数と伝送電力に着目した電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, 電気学会論文誌 D, Vol. 137, No. 5, pp. 445-457(2017)
- (7) Hideaki Hujita: "A high-efficiency Diode-Clamped Linear Amplifier", IEEJ Trans. on Industry Applications, Vol. 127, No. 1, pp. 9-16 (2007)
藤田 英明: 「ダイオードクランプ回路を用いた高効率線形増幅回路」, 電気学会論文誌 D, Vol. 127, No. 1, pp. 9-16 (2007)
- (8) Hidemine Obara, Tatsuki Ohno, Masaya Katayama, Atsuo Kawamura: "Flying-Capacitor Linear Amplifier with Capacitor Voltage Balancing for High-Efficiency and Low Distortion", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.57, No.1 (2021)
- (9) 楠居琳太郎, 日下佳祐, 伊東淳一: 「フライングキャパシタ形線形増幅回路を用いた非接触給電システムにおける漏えい磁界の高調波低減」, 産業応用部門オンライン研究会, SPC-20-131 (2020)
- (10) 楠居琳太郎, 日下佳祐, 伊東淳一: 「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」, 令和 3 年 電気学会 全国大会, pp. 142-143 (2021)