

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

楠居 琳太郎*, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Voltage Balancing for Flying-capacitor Linear Amplifier for Wireless Power Transfer System
Rintaro Kusui*, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

非接触給電システムはインバータ出力電圧の低次高調波に起因した漏えい磁界が発生する⁽¹⁾。そこで、筆者らは非接触給電システムにおいて漏えい磁界の低次高調波を低減可能なフライングキャパシタ型線形増幅回路(FCLA)を1次側電源として提案している⁽²⁾。提案回路は正弦波電圧の出力が可能であるが、FC電圧をバランスさせる必要がある。本論文では、キャリア比較による動作領域の選択と自己バランス機能によりFC電圧がバランスすることを実験により検証したので報告する。

2. 提案するフライングキャパシタ型線形増幅回路

<2・1> 提案するFCLAの構成

図1にMOSFETの動作領域を示す。MOSFETの動作領域は線形、飽和、遮断領域に分けられる。通常のスイッチング電力変換回路では線形領域と遮断領域のみを用いる。一方で、FCLAは直列接続されたMOSFETの一つを飽和領域で用いることで連続的な電圧を出力する。

図2に提案するFCLAを用いた非接触給電システムの構成を示す。提案するFCLAは n 直列FCLAと極性切り替え回路で構成される。非接触給電システムは共振条件で動作するとき、力率は1となる。このため、極性切り替え回路を接続することにより電源からは正電流のみが出力される。文献(3)において、提案されているFCLAは負電流を出力するためにP-ch MOSFETを必要としている。そこで、本論文では極性切り替え回路を用いることでP-ch MOSFETをダイオードに置き換えている。また、提案するFCLAはFC電圧をバランスさせるために、各MOSFETにそれぞれ絶縁されたゲートドライブ回路(GDU)を接続する。このGDUにより、各MOSFETの動作領域を独立に制御することが可能となり、任意の電流経路を選択できる。

<2・2> 位相シフトキャリアを用いたFC電圧バランス

図3に4直列FCLAを例として、位相シフトキャリアを用いたMOSFETの動作領域の選択法を示す。MOSFETの動作領域を線形、飽和、遮断領域から1つ選択するために2つの階段状のしきい値と出力周波数に非同期なキャリアを比較する。FCLAでは動作領域の変化を少なくするためにキャ

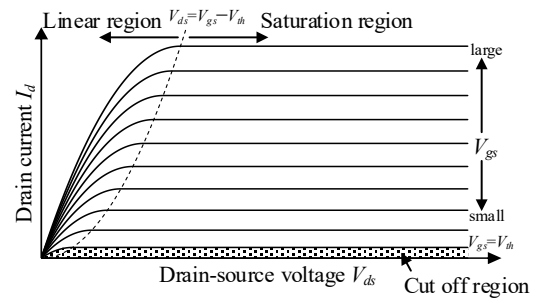


図1 N-ch MOSFETの動作領域

Fig. 1. Operation region of N-ch MOSFET.

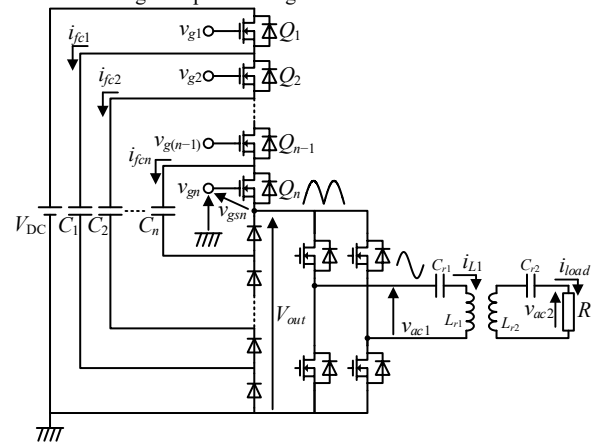


図2 提案するWPTシステム向けのFCLAの構成

Fig. 2. FCLA with an unloader for WPT.

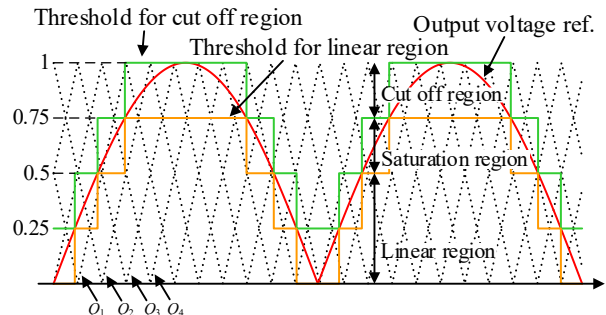


図3 4直列FCLAにおける動作領域の選択法

Fig. 3. Region selection by comparison with phase-shifted carriers.

リア周波数を出力周波数と同等もしくは数倍の値に設定する。しかし、キャリア周波数が出力周波数に同期している

と、毎出力半周期で同じ電流経路を取るようになる。これにより電圧時間積の誤差が蓄積され、FC 電圧はアンバランスする。そこで、非同期キャリアを用いることで、FC に流れる電流の経路を毎出力半周期変化させる。これにより、数キャリア周期内で FC の電流時間積の和がゼロとなり、FC 電圧がバランスする。

図 4 に電圧制御器の構成を示す。FCLA は出力電圧指令から、P 制御器によってゲートソース電圧 v_{gs} を生成し、各 MOSFET に入力する。さらに、キャリア比較により選択された動作領域はゲートソース電圧にオフセットを加えることで制御される。また、FC 電圧がアンバランスした場合には、制御器がゲートソース電圧にオフセットを加えることにより、各 MOSFET の動作領域を変化させる。動作領域が変化することで、電流経路は FC 電圧が過多である場合には放電する方向に、不足する場合は充電する方向に変化する。この電圧制御器の働きにより、外乱などによって生じる FC 電圧アンバランスは自動的に補償される。

3. 実験結果

キャリア比較による領域の選択と電圧制御器の働きによる FC 電圧のバランスを 2 直列 FCLA と極性切り替え回路によって検証した。提案システムは最終的に大容量向けに直流電圧 640 V 程度を想定している。このとき、効率の観点から素子は 16 段程度が望ましい。しかし、本論文では電圧バランス機能の原理検証を目的としているため、2 段構成とし、試験用の直流電圧は最終的なシステムで MOSFET に印加される電圧を同等である 80 V とし、負荷は 100 Ω の抵抗とした。また、出力電圧の指令値 V_{out}^* は振幅 80 V、周波数 50 Hz の正弦波の全波整流電圧とした。図 5(a) に検証器の動作波形を、図 5(b) に (a) を拡大した波形をそれぞれ示す。図 5(a) より、FCLA は FC 電圧のバランスを維持しつつ動作していることが確認できる。図 5(b) より、FCLA が指令値に追従した全波整流電圧を出力し、極性切り替え回路によって負荷に正弦波電圧が印加されていることが確認できる。

図 6 に出力電圧の高調波解析結果を示す。また、基本波の実効値が等しい方形波電圧の高調波についても示している。図 6 より、検証器の出力電圧の奇数次高調波は方形波と比較し 10dB 以上低減できていることが確認できる。特に 3 次高調波に着目すると、19.8dB 低減している。検証器の出力に含まれる偶数次高調波は FCLA 出力電圧に生じているひずみによるもので、絶縁アンプにおけるむだ時間が原因である。今後、むだ時間補償を導入するなど、改善する予定である。

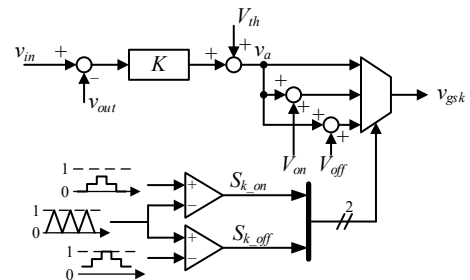
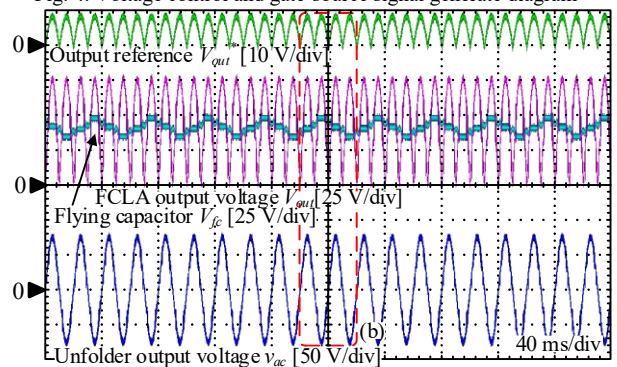
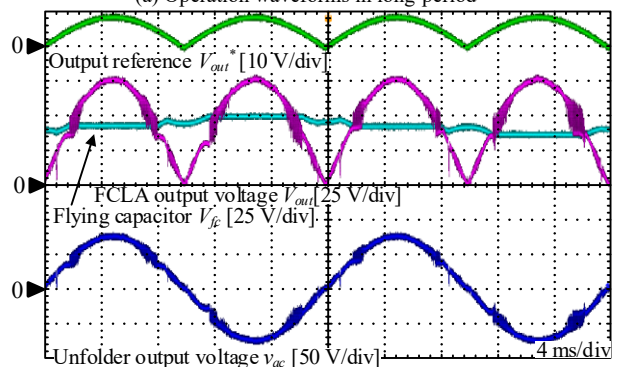


図 4 電圧制御器のブロック図

Fig. 4. Voltage control and gate-source signal generate diagram



(a) Operation waveforms in long-period



(b) Enlarged operation waveforms

図 5 2 直列 FCLA の動作波形

Fig. 5. Operation waveforms of 2-series FCLA.

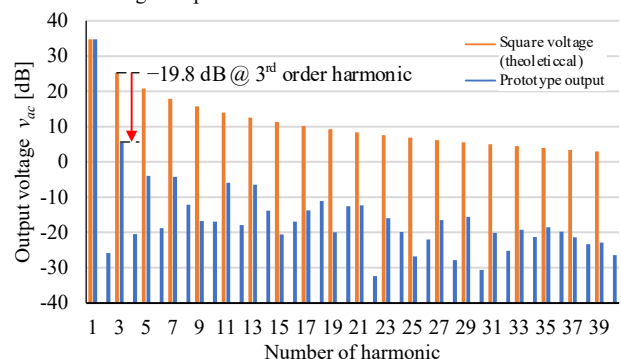


図 6 極性切り替え回路出力電圧の高調波解析

Fig. 6. Harmonic analysis of unfold output voltage.

文献

- (1) 鈴木正俊 他, 産業応用部門大会, 4-11, p. IV-109 - 112, (2016)
- (2) 楠居琳太郎 他, 産業応用部門オンライン研究会, pp.9 - 12, (2020)
- (3) H. Obara, etc.: IPEC-ECCE Asia 2018, pp.1649-1654, (2018)