

# 線形動作によるスイッチトキャパシタコンバータの ピーク電流最小化

野本 俊作      日下 佳祐（長岡技術科学大学）

## Peak Current Minimization in a Switched-Capacitor Converter Using Linear Operation

Shunsaku Nomoto, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a current peak minimization method for a 4:1 switched-capacitor step-down converter (SCC) using the linear operation of MOSFETs. In the proposed method, the drain-source voltage of the MOSFETs is controlled so that the transferred charge in each operating mode is maintained while the charging and discharging currents are shaped. As a result, current peaks are suppressed without adding passive components, such as inductors. SCC prototypes show that the output current peak is reduced by 6.6 A compared with the conventional switching operation, while the decrease in the average output voltage is limited to 0.56 V. In addition, harmonic analysis demonstrates that the fourth-order harmonic component of the switching frequency is reduced by 2.2 Arms. These results verify the effectiveness of the proposed method for reducing current harmonics in SCCs.

**キーワード** : DC/DC コンバータ, スwitchトキャパシタコンバータ, 線形動作, 電磁干渉

**Keywords** : DC/DC converter, Switched-capacitor converter, Linear operation, Electromagnetic interference (EMI)

### 1. はじめに

近年、車載電気・電子システムでは、先進運転支援システム (ADAS) や電動アクチュエータ等の搭載数増加に伴い、低電圧電源系に要求される電力が増大している。従来の 12 V 配電では、大電流化に伴う配線重量の増加や導通損失の増大が課題となる。これに対し、48 V 配電は、同一電力に対して電流を原理的に 1/4 に低減できるため、配線重量、配線コスト、および導通損失の低減に有効な手段として注目されている<sup>(1),(2),(3)</sup>。一方で、既存の 12 V 負荷を駆動するためには、48 V から 12 V へ降圧する DC/DC コンバータが必要となる。このようなコンバータは車載機器内の限られた空間に実装されるため、高電力密度化が求められる。また、高電圧化および高速スイッチングに伴う電磁ノイズの増加も懸念されることから、小型化と堅牢な電磁両立性 (EMC) 設計の両立が重要となる<sup>(3),(4)</sup>。

このような DC/DC コンバータの候補として、スイッチトキャパシタコンバータ (SCC) が挙げられる。SCC は、磁気部品の削減または不要化が可能であり、高電力密度化に適した回路方式である。これまでに、SCC に対してインダクタを併用するハイブリッド SCC など、様々な方式が提案されている<sup>(5),(6),(7)</sup>。磁気部品を用いないハードスイッチン

グ SCC は、部品点数を削減できる利点を有する一方、スイッチング時のキャパシタ間の電荷再配分に伴ってサージ電流が発生し、効率低下や電磁干渉 (EMI) 増加の要因となる<sup>(5)</sup>。一方、インダクタを用いるハイブリッド SCC では、電流波形の制御やソフトスイッチングにより高効率な電力変換が可能となるが、追加受動部品により回路規模や実装体積が増加する<sup>(6),(7)</sup>。

これらに対して、MOSFET を線形動作させることにより、追加のインダクタを用いずにサージ電流を抑制する手法が提案されている<sup>(8)</sup>。この手法は、ゲートソース間電圧を段階的に制御することで、サージ電流抑制と高効率動作の両立を図るものである。しかし、MOSFET を線形動作させる際の設計指針は十分に明確化されておらず、動作条件によっては効率が大きく低下する場合がある。また、サージ電流抑制によるノイズ低減効果についても、定量的な評価は十分に行われていない。

そこで本研究では、SCC において効率を維持しつつサージ電流のピーク値を最小化する新たな MOSFET 制御法を提案する。出力電圧測定および出力電流の高調波解析により、提案法が電力変換効率および電流高調波に与える影響を定量的に評価し、その有効性を示す。

## 2. 4:1 降圧 SCC の動作原理および特性

〈2・1〉 動作原理および効率 図 1 に 4:1 降圧 SCC の回路図を示す。本回路はフライングキャパシタの充放電により、入力電圧  $V_{in}$  の 0.25 倍の電圧  $V_{out}$  を出力する。

キャパシタの充電効率  $\eta_{ch}$  は電流経路内の抵抗成分に依存しないことが知られており、(1)式のように表される<sup>9)</sup>。ここで、 $V_{Cmin}$ : 充電前のキャパシタ電圧、 $V_{Cmax}$ : 充電後のキャパシタ電圧である。

$$\eta_{ch} = \frac{V_{Cmin} + V_{Cmax}}{2V_{in}} \quad (1)$$

また、RC 直列回路に流れる電流  $i_{ch}$  は

$$i_{ch}(t) = \frac{V_{Cmax} - V_{Cmin}}{R_{ch}} e^{-\frac{t}{R_{ch}C_{ch}}} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $R_{ch}$ : 電流経路内の抵抗成分、 $C_{ch}$ : キャパシタ容量である。このとき、充電時間  $T_{ch}$  における電荷移動量  $q_{ch}$  は(2)式を時間積分することで得られる。

$$q_{ch}(T_{ch}) = \int_0^{T_{ch}} i_{ch}(t) dt = C_{ch}(V_{Cmax} - V_{Cmin})(1 - e^{-\frac{T_{ch}}{R_{ch}C_{ch}}}) \quad (3)$$

時定数が充電時間よりも十分短い場合 ( $R_{ch}C_{ch} \ll T_{ch}$ ),

$$q_{ch}(T_{ch}) \approx C_{ch}(V_{Cmax} - V_{Cmin}) \quad (4)$$

のように近似できる。したがって、(4)式を満たす条件では、充電経路内の抵抗成分は最終的な電荷移動量にはほとんど影響せず、主に充電時定数および電流波形を変化させる。一方、抵抗成分の増加により時定数が充電時間に対して無視できなくなる場合、(3)式より電荷移動量は減少する。この場合、充電後のキャパシタ電圧は目標値まで到達せず、結果として(1)式で表される充電効率も低下する。

ただし、4:1 降圧 SCC では、複数のフライングキャパシタ、スイッチ、寄生抵抗、および出力負荷が周期的に接続されるため、その動作は単純な RC 回路よりも複雑である。実際に(4)式を満たす場合であっても、動作条件によっては充放電経路内の抵抗成分が効率低下の要因になることが報告されている<sup>9)</sup>。

〈2・2〉 提案手法 図 2 に提案する MOSFET の制御法を示す。本手法では素子のドレインソース電圧波形を制御することで、SCC の入出力電流のピーク値を低減する。図 3 に 4:1 降圧 SCC の等価回路を示す。 $V_{fj}$ ,  $C_{eqj}$  はある動作モードにおける電圧および等価的な静電容量、 $v_{DSj}$  は線形動作する素子のドレインソース電圧、 $R_{ESRj}$  は電流経路内の寄生抵抗成分である。動作モード  $j$  の期間  $T_j$  に移動する電荷  $q_j$  は

$$q_j = \int_0^{T_j} i_j(t) dt \quad (5)$$

と表せるので、その際の平均電流  $I_{ave,j}$  は

$$I_{ave,j} = \frac{q_j}{T_j} \quad (6)$$

となる。前節で述べたように、移動する電荷が変わらなけ

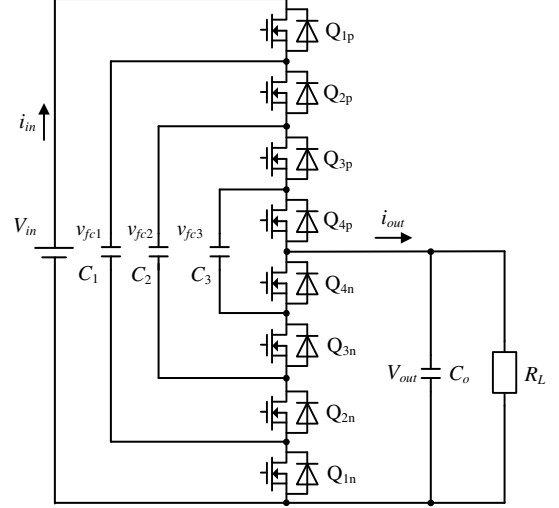


Fig. 1. The 4:1 switched-capacitor step-down converter (SCC).

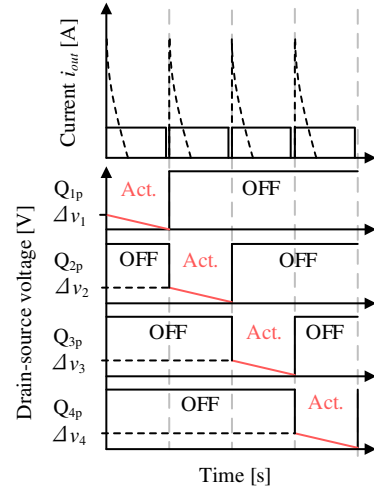


Fig. 2. The proposed control of MOSFETs.

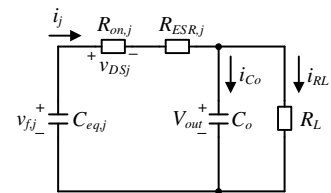


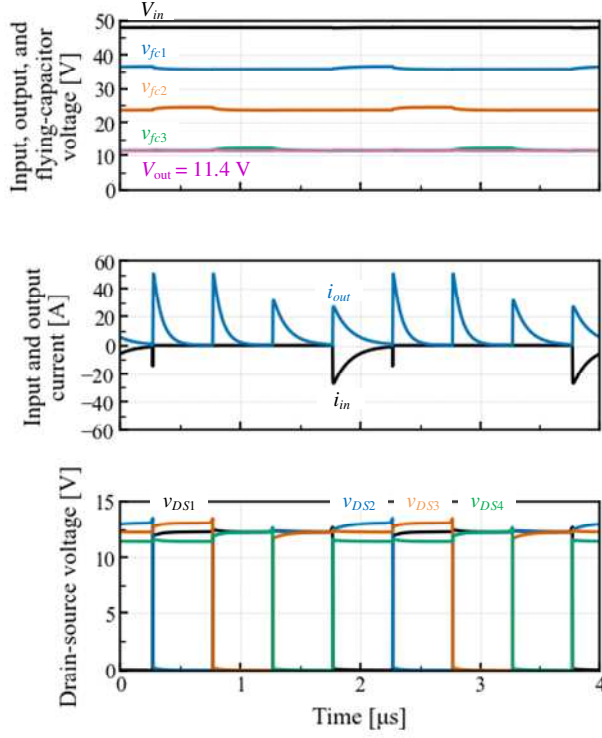
Fig. 3. The equivalent circuit of the 4:1 SCC.

れば、充電効率は変化しない。また、電流ピークは必ず平均電流以上になる。したがって、電荷移動量を維持する条件  $v_{fj}(T_j) = V_{out}(T_j)$  とピーク電流最小化を同時に満たすには(6)式の電流をオン期間中に流し続けられるように MOSFET を制御すればよい。このとき、

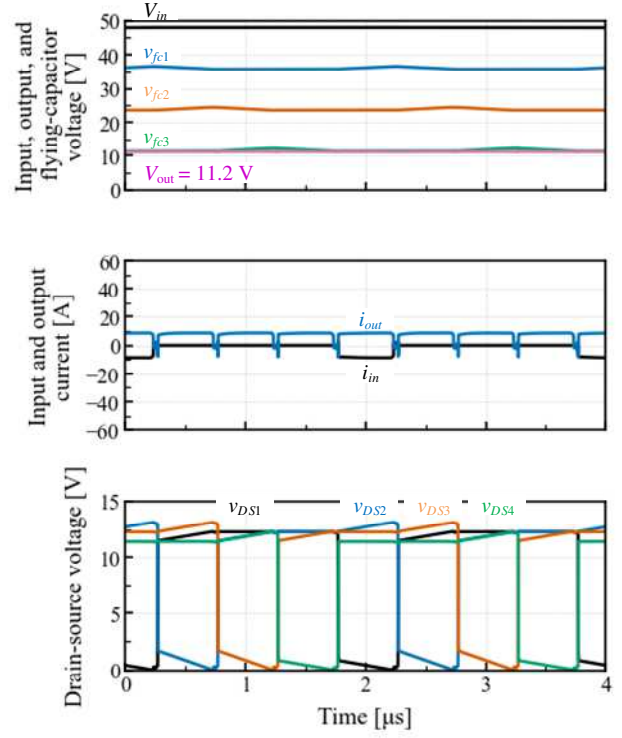
$$i_j(t) = -C_{eq,j} \frac{dv_{f,j}(t)}{dt} = I_{ave,j} \quad (7)$$

$$v_{f,j}(t) = v_{f,j}(0) - \frac{I_{ave,j}}{C_{eq,j}} t \quad (8)$$

が成り立つ。(5)~(8)式を満たす定電流充放電を実現するためのドレインソース電圧指令は



(a) Conventional method.



(b) Proposed method.

Fig. 4. Operational waveforms of the 4:1 switched-capacitor step-down converter in simulation.

$$v_{DS,j}(t) = v_{f,j}(0) - \frac{I_{ave,j}}{C_{eq,j}} t - V_{out}(t) - R_{ESR,j} I_{ave,j} \quad (9)$$

ここで、寄生抵抗成分が十分小さいとして無視すると、

$$v_{DS,j}(0) \approx v_{f,j}(0) - V_{out}(0) = \Delta v_j \quad (10)$$

$$v_{DS,j}(T_j) \approx v_{f,j}(T_j) - V_{out}(T_j) = 0 \quad (11)$$

となり、動作モード切り替わり時の入出力電圧差 $\Delta v_j$ から0まで直線的に素子のドレインソース電圧を下げることでピーク電流を最小化できる。

### 3. シミュレーション検証

提案手法による電流ピーク抑制効果をシミュレーションにて確認した。条件を表1に示す。キャリア位相シフト変調を適用して4:1の降圧動作を実現している<sup>(10)</sup>。

図4にハードスイッチングSCCとして単純にスイッチング動作させた従来法と提案法を適用した場合のSCCの各種動作波形を示す。従来法では、素子オン時にラッシュ電流が流れ、一部フライングキャパシタの充放電が短時間で完了している。一方、提案法は各素子のドレインソース電圧を線形に低下させることで、各フライングキャパシタ電圧は各素子のオン期間全体にわたって緩やかに変化する。その結果、定電流での充放電動作が実現でき、入出力電流ピーク値を大幅に低減し、出力電圧平均値の低下も従来法に対して0.2 Vに抑制している。

Table 1. Simulation conditions.

|                                   |          |                   |
|-----------------------------------|----------|-------------------|
| Input voltage                     | $V_{in}$ | 48 V              |
| Road resistance                   | $R_L$    | 1.44 $\Omega$     |
| Capacitance of dc-link capacitors | $C_o$    | 470 $\mu\text{F}$ |
| Capacitance of flying capacitor   | $C_j$    | 4.7 $\mu\text{F}$ |
| Switching frequency               | $f_{sw}$ | 500 kHz           |
| Duty                              | $d$      | 0.25              |

Table 2. Experimental conditions.

|                                   |          |                    |
|-----------------------------------|----------|--------------------|
| Input voltage                     | $V_{in}$ | 48 V               |
| Road resistance                   | $R_L$    | 1.20 $\Omega$      |
| Capacitance of dc-link capacitors | $C_o$    | 470 $\mu\text{F}$  |
| Capacitance of flying capacitor   | $C_j$    | 10.0 $\mu\text{F}$ |
| Switching frequency               | $f_{sw}$ | 50 kHz             |
| Duty                              | $d$      | 0.25               |

### 4. 実験結果

表2に実験条件を示す。素子のドレインソース電圧制御手法として、文献(11)に示されているゲートドライバ構成を採用した。また、本実験では、下アームのMOSFETを全てオフとした状態でSCCを動作させている。

〈4.1〉動作波形 図5に、従来法および提案法を適用した場合のSCCの動作波形を示す。従来法では、電圧差を有する入力、フライングキャパシタ、および出力をスイッチングにより直接接続するため、ピーク値の大きい出力電流が発生している。一方、提案法では、MOSFETを線形動作させることにより、フライングキャパシタ電圧が素子のオン時間全体にわたって緩やかに変化する。これによ

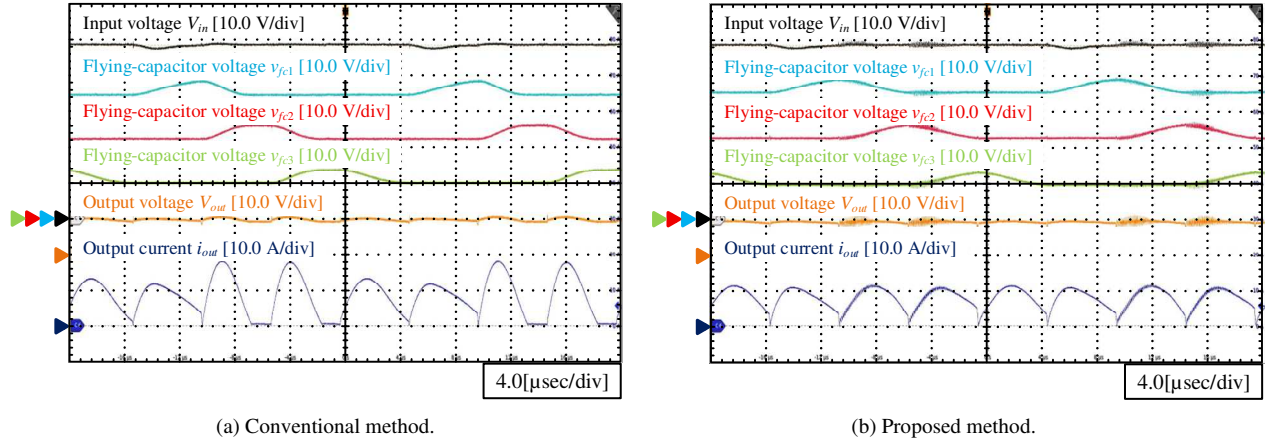


Fig. 5. Operational waveforms of the 4:1 switched-capacitor step-down converter in prototypes.

り、出力電流のピーク値は従来法と比較して 6.6 A 低減された。また、平均出力電圧の低下は 0.56 V にとどまっており、提案法により出力電圧の大幅な低下を抑制しつつ、電流ピーク値を低減できることを確認した。

〈4・2〉高調波解析 図 6 に SCC 出力電流の高調波解析結果を示す。提案法では、従来法と比較して出力電流の低次高調波成分が抑制されており、特にスイッチング周波数の 4 次高調波 (200 kHz) 成分は 2.2 Arms 低減した。一方で、一部の高次高調波成分は増加している。これは、図 5 に示した実験波形にもみられるように、素子のドレインソース電圧制御時に生じる電圧波形の振動に起因すると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、4:1 降圧 SCC を対象として、MOSFET の線形動作を用いた電流ピーク値低減法を提案した。提案法では、各動作モードにおける電荷移動量を維持するように素子のドレインソース電圧を制御することで、出力電圧の大幅な低下を抑制しつつ、充放電電流のピーク値を最小化する。実機検証により、従来法と比較して出力電流ピーク値を 6.6 A 低減できることを示した。さらに、出力電流の高調波解析により、スイッチング周波数の 4 次高調波成分を 2.2 Arms 低減できることを確認した。しかし、一部の高次高調波成分は増加しており、これはドレインソース電圧制御時の電圧波形の振動に起因すると考えられる。今後は、より高効率な条件における SCC 動作検証および疑似電源回路網 (LISN) を用いた伝導ノイズの評価を行う。

## 文 献

- (1) M. Eaker : "48V Automotive Systems: Why Now?", Texas Instruments, White Paper, SLYY243, pp.1-7 (2025), available: <https://www.ti.com/lit/SLYY243> (accessed 2026-06-06)
- (2) Infineon Technologies AG : "Zone Control Units: the key to realizing future automotive architectures", White Paper, pp.1-19 (2025), available: [https://www.infineon.com/ja/gated/zone-control-units-realizing-future-automotive-architectures-whitepaper\\_d03ae415-ea63-4652-909a-f4b595cfdff4](https://www.infineon.com/ja/gated/zone-control-units-realizing-future-automotive-architectures-whitepaper_d03ae415-ea63-4652-909a-f4b595cfdff4) (accessed 2026-06-06)
- (3) S. Krishnan, M. E. Blackwell, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "An EMI-

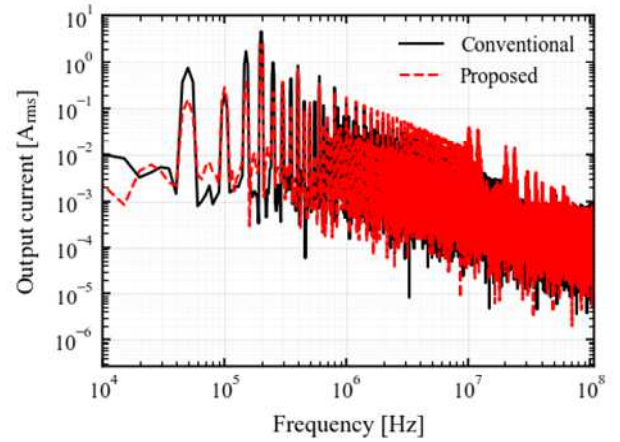


Fig. 6. Harmonic analysis of output current.

- Compliant and Automotive-Rated 48V to Point-of-Load Dickson-Based Hybrid Switched-Capacitor DC-DC Converter," in 2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), pp. 1-7 (2023)
- (4) C. Chen, N. Abi Jaoude, A. Chen, and D. Li : "Reducing Conducted EMI in a Buck Converter for 48 V Automotive Applications", Texas Instruments, Application Note, SNVAA93, pp.1-12 (2023), available: <https://www.ti.com/lit/SNVAA93> (accessed 2026-06-06)
- (5) Fan Zhang, Lei Du, Fang Zheng Peng, and Zhaoming Qian, "A New Design Method for High-Power High-Efficiency Switched-Capacitor DC-DC Converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 2, pp. 832-840 (2008)
- (6) Y. Lei, W.-C. Liu, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "An Analytical Method to Evaluate and Design Hybrid Switched-Capacitor and Multilevel Converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 3, pp. 2227-2240 (2018)
- (7) S. R. Pasternak, M. H. Kiani, J. S. Rentmeister, and J. T. Staugh, "Modeling and Performance Limits of Switched-Capacitor DC-DC Converters Capable of Resonant Operation With a Single Inductor," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 5, no. 4, pp. 1746-1760 (2017)
- (8) 松浦浩一, 伊東淳一 : "スイッチトキャパシタコンバータの線形領域を利用したサージ電流抑制法の基礎検証, "半導体電力変換産業電力電気応用合同研究会, SPC-09-152/IEA-09-022, pp. 1-6 (2009)
- (9) C.-K. Cheung, S.-C. Tan, C. K. Tse, and A. Ioinovici, "On Energy Efficiency of Switched-Capacitor Converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 2, pp. 862-876 (2013)
- (10) C. Feng, J. Liang, and V. G. Agelidis, "Modified Phase-Shifted PWM Control for Flying Capacitor Multilevel Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 1, pp. 178-185 (2007)
- (11) S. Nomoto and K. Kusaka, "A Low-Noise High-Frequency Power Supply Based on Linearly-Operated MOSFETs for EMF Reduction in WPT Systems," in 2025 IEEE Energy Conversion Conference Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-6 (2025)