

## Development of Multiport Converter based on Switched Capacitor Converter

Kazuki Sugiyama and Masatoshi Uno

Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511, Japan

### *Abstract*

Multiport converters (MPCs) that can reduce the converter count have been proposed for the systems comprising multiple power sources. However, most conventional MPCs require a multi-winding transformer that triggers the upsizing of a circuit.

Switched capacitor (SC)-based MPCs that can achieve the miniaturized circuit are proposed in this study. Various SC-MPCs can be derived from the SCCs' basic configuration, the number of stages, and control methods. Four types of the basic SCCs were quantitatively compared, and the ladder-type SCC was selected according to the comparison.

The ladder-type SC-MPC integrating a PWM synchronous boost converter and a series resonant converter was analyzed as a representative topology. The SC-MPC was controlled by PWM plus pulse frequency modulation control. If two control schemes are used simultaneously, consideration about the cross regulation is required. Therefore, an experiment was carried out to confirm the cross regulation. In conclusion, the influence of the cross regulation on the circuit operation was found to be insignificant.

# スイッチトキャパシタコンバータを基礎としたマルチポートコンバータの開発

茨城大学 杉山一希、鵜野将年

## 1. はじめに

人工衛星の電源システムにおいて非安定バス方式が広く知られている。Fig. 1(a)に示す非安定バス方式は、システム内に1台のコンバータを有する方式であり、コンバータが太陽電池の電力制御とバッテリーの充電を同時に行う。しかしバッテリーと負荷が並列に接続されるため、バッテリーの電圧は負荷の電圧により一義的に決定されてしまう。故に非安定バス方式は、バッテリーの設計自由度に乏しいという欠点を持つ。それに対して、Fig. 1(b)に示す安定化バス方式では負荷電力制御用のコンバータに加えて、バッテリーの充放電を制御するBCDR (Battery Charge or Discharge Regulator) を用いることにより、バッテリーの電圧が負荷電圧に固定されることなくバッテリーの設計に自由度を持たせることができる。しかし、2台のコンバータを必要とするため、システムが複雑化するという欠点を持つ。

近年、1台で複数の電源を同時に制御可能なマルチポートコンバータ (MPC: Multiport Converter) が研究されている。MPCは、バッテリーと負荷の電圧を1台で制御することができるため、コンバータ台数を削減することができる。

しかし、従来MPCの多くは多巻線トランスを採用しており、これは回路の設計難ならびに大型化を招く。Fig. 1(c)にMPCを用いた電源システムのプロトタイプを示す。

回路の小型・高電力密度化を実現可能な方式としてスイッチトキャパシタコンバータ (SCC: Switched Capacitor Converter) が知られている。SCCはエネルギー蓄積素子としてキャパシタを用いている。一般的に、キャパシタのエネルギー密度はインダクタの100~1000倍であるため回路の小型化が可能である。本稿では、回路の小型化を目的とし、SCを基礎としたMPC (SC-MPC) を提案する。

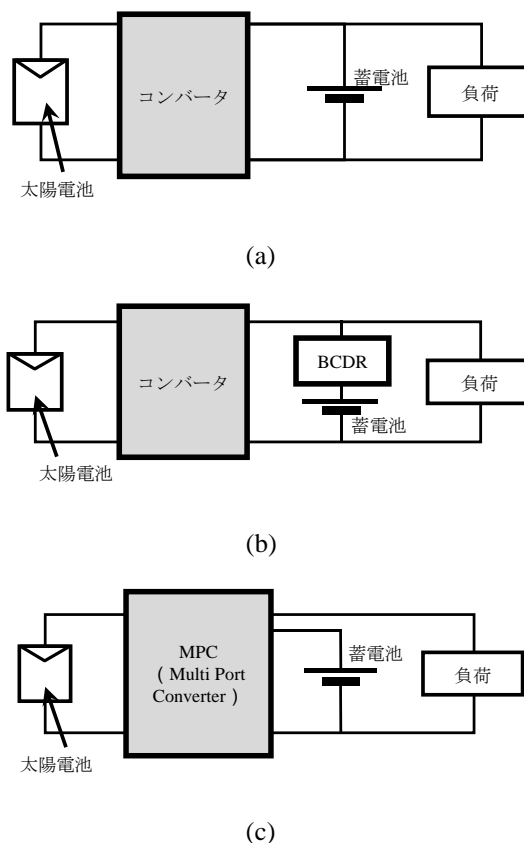


Fig. 1. 人工衛星の電源システム (a) 非安定バス方式、(b) 安定化バス方式、(c) MPCを用いた方式

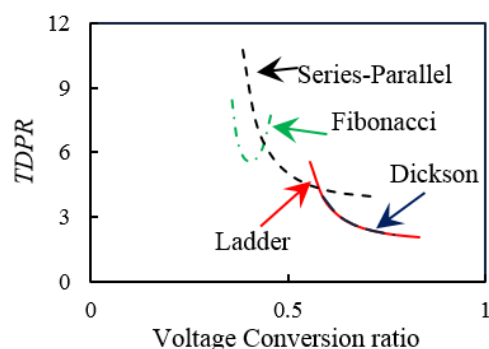
## 2. 複数方式の SCC に対する定量比較

SCC は電圧変換比が回路構成によって固定されてしまうという欠点を持つため、インダクタを接続することで PWM 制御を実現可能な SCC 方式である PWM-SCC を SC-MPC 導出のための基礎回路とした。SCC を MPC に適用するにあたり、インダクタを接続した 4 方式の PWM-SCC に対し定量比較を実施した。複数方式の SCC を定量比較するにあたり 2 つの指標を用いた。1 つは  $TDPR$  (total device power rating) と呼ばれる指標であり、スイッチの電圧-電流のストレス総和を出力電力で正規化することで算出される。算出された値が低い程、より高速かつ低オン抵抗の低耐圧スイッチの使用が可能となり、結果としてコンバータの電力変換効率の向上に寄与する。もう 1 つの指標は正規化蓄積エネルギー  $E$  であり、これは回路内のインダクタ及びキャパシタのエネルギーを出力電力で正規化することで算出される。この値が低い程、回路のサイズを小型化することができる[1]。

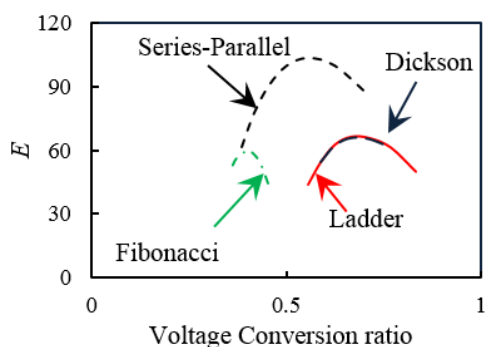
Fig. 2 に定量比較の結果を示す。 $TDPR$  については、広い範囲で Ladder 方式と Dickson 方式が低い値を示した。一方、 $E$  については、Ladder 方式、Dickson 方式、Fibonacci 方式が低い値を示した。以上の結果を踏まえると、バランスの良い方式は Ladder 方式と Dickson 方式となるが、これら 2 つについては優劣がつかなかった。従って別の指標を設ける必要があると考えられる。今回は最も汎用的に用いられている Ladder 方式の SCC を基礎とした SC-MPC の導出を行った。

## 3. SC-MPC の電圧変換特性及び実機検証

本稿で提案する SC-MPC は Fig. 3 に示す PWM 昇圧コンバータ、直列共振コンバータ、SCC の 3 種類のコンバータを統合することで導出される。Fig. 4 に導出した SC-MPC を示す。提案回路は、2 種類の電源を同時に制御可能である。導出した SC-MPC はデューティ  $d$  (スイッチング 1 周期におけるスイッチのオン時間の割合) を操作する PWM (Pulse Width Modulation) とスイッチング周波数  $f$  を操作する PFM (Pulse Frequency Modulation) 制御を同時に用いる。提案回路は、 $d$  でバッテリー電圧を、 $f$  で出力電圧を制御する。しかし、同一回路上に二つの制御が混在するため、制御の相互依存が懸念される。そこで提案回路における PWM 制御及び PFM 制御の有効性と制御の相互依存の影響を実機にて検証する。



(a)



(b)

Fig. 2.4 種類の PWM-SCC の比較 (a)  $TDPR$ 、(b)  $E$

### 3.1. SC-MPC の電圧変換特性

太陽電池の電圧を  $V_i$ 、バッテリー電圧を  $V_{bat}$  とした時、PWM 制御による電圧変換比  $M_{bat}$  を以下の式で定義する。

$$M_{bat} = \frac{V_{bat}}{V_i} \quad (1)$$

また負荷電圧を  $V_o$  とした時 PFM 制御による電圧変換比  $M_o$  を以下の式で定義する。

$$M_o = \frac{V_o}{V_{bat}} \quad (2)$$

理想的には  $M_{bat}$  は  $f$  に対する依存性がなく、同様に  $M_o$  は  $d$  に対する依存性がない。しかし、非理想的な回路において何らかの理由により制御に相互依存性がある場合、出力電圧やバッテリー電圧に予期せぬ電圧変動が生じる可能性が懸念される。

### 3.2. 実機検証

制御の相互依存を検証するために、回路の電圧変換比  $M_{bat}$ 、 $M_o$  に関する実機検証を行った。 $f$  と  $d$  のいずれか一方を固定し、もう一方を変動させつつ  $M_{bat}$  と  $M_o$  を測定した。代表的な条件として、 $f = 100 \text{ kHz}$  に固定して  $d$  を変動させた場合の結果を Fig. 5(a) に示す。また  $d = 0.5$  固定で  $f$  を変動させた場合の結果を Fig. 5(b) に示す。

Fig. 5(a) の結果より、 $d$  の上昇とともに  $M_{bat}$  は下降する一方、 $d$  の変化に対する  $M_o$  の変化は僅かであった。また、Fig. 5(b) に示すように、 $f$  とともに  $M_o$  は上昇する一方で、 $M_{bat}$  にはほとんど変化が見られなかった。 $f$  および  $d$  の固定値を変化させた場合において

も同様の傾向を得た。以上の結果より、提案回路における相互依存の影響は僅かであることから、PWM と PFM を用いてバッテリー電圧と出力電圧を独立に制御可能であることが示唆された。

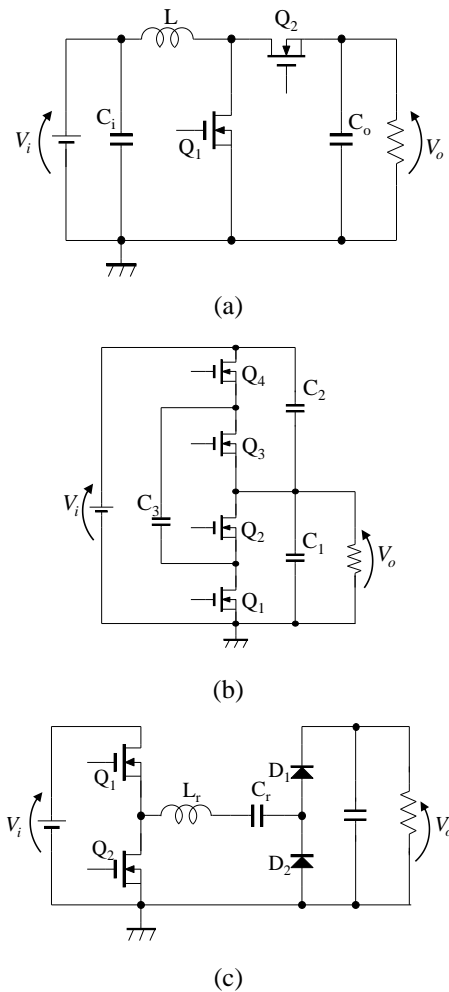


Fig. 3. 統合する 3 種類のコンバータ (a) PWM 昇圧コンバータ、(b) SCC、(c) 直列共振コンバータ

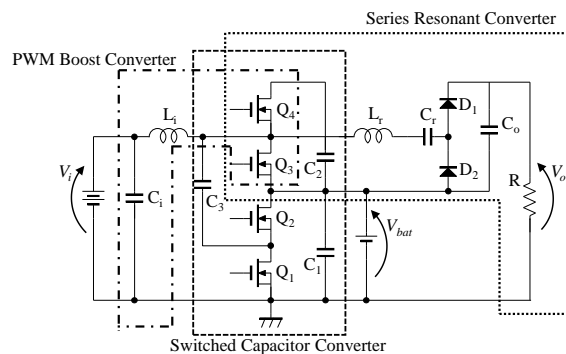


Fig. 4. 提案する SC-MPC

#### 4. まとめ

本稿では、コンバータの台数削減と回路の小型化を目的として、SCCを基礎としたMPCの提案を行った。導出されたSC-MPCは、2種類の電源を同時に制御可能である。提案回路においては2種類の制御を同時に用いるため制御の相互依存が懸念されたが、実機検証の結果より相互依存の影響は僅かであることが示された。

#### 参考文献

[1] M. Uno, "High Step-down Integrating Switched Capacitor Converter and PWM Synchronous Buck Converter," *IEEE International Telecommunications Energy Conf.* pp. 273–278, 2013.

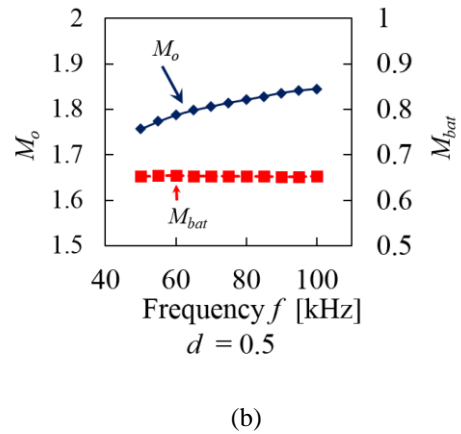
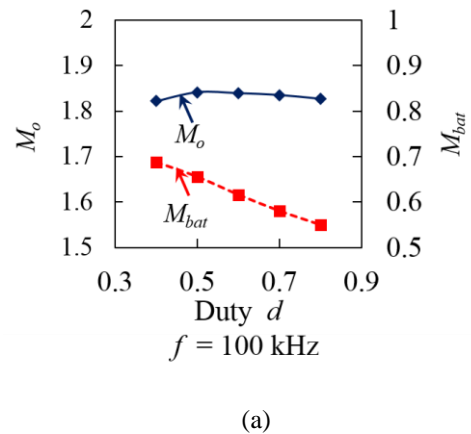


Fig. 5. 電圧変換特性  $M_{bat}$  と  $M_o$  (a)  $f = 100$  kHz で  $d$  を変動、(b)  $d = 0.5$  で  $f$  を変動