

## 電動航空機向けマルチレベル変換器システムと 協調制御による軽量化

Light weight power electronic system using the combination of 2 converters for the electric aircraft

岩田 明彦 (Iwata Akihiko)

### 1. 研究概要

地球温暖化ガス対策は急務であり、各産業界では温暖化ガスを排出しない方式への移行や機器の高効率化によって温暖化ガスの排出量を抑制する取り組みを進めている。航空機産業では 2040 年頃の実用化を目指して電動航空機の研究・開発が本格化している<sup>(1),(2)</sup>。航空機の電動化では数 MW~数 10MW の軽量 DC グリッドの採用が検討されており、発電機で得られた直流電圧やバッテリーの電圧を安定化する DC/DC コンバータが必要とされる。しかし、従来の PWM 方式の DC/DC コンバータはリアクトルの重量が大きく航空機への搭載には不向きである。そこでフライングキャパシタを用いたスイッチドキャパシタコンバータが軽量 DC/DC コンバータの候補として期待されている<sup>(3)</sup>。筆者らは、航空機向けとして 5 段階の昇圧が可能な階調制御型スイッチドキャパシタコンバータを提案し、配線程度のインダクタでも安定した昇圧動作が可能なことを 21 年度の学内研報告や学会にて発表済みである<sup>(4)</sup>。本報では、発電機後段の AC/DC コンバータを模擬した PWM チョップと階調制御型スイッチドキャパシタコンバータとを組み合わせたコンバータシステムについて報告する。PWM チョップとスイッチドキャパシタコンバータとの連携制御により、チョップの入力電圧が大きく変化した場合でも安定した DC 出力が得られることを示す。またスイッチドキャパシタコンバータの昇圧切替え動作時にチョップによる電流制限動作モードを利用することで、切替え時過電流を許容範囲内に抑制できることを示した。

### 2. 階調制御型スイッチドキャパシタコンバータ

図 1 は階調制御型スイッチドキャパシタコンバータ(Gradationally Controlled Switched Capacitor Converter :GC-SCC)を示しており、2 つのビットインバータの出力電圧を加減算することにより、5 段階の昇圧率を得ることができる。ビットインバータの加減算時の回路ループに起電力が生じないよう電圧が設定されているものの、実際には電圧のずれが生じるためループ内に起電力が発生し、電源電流のリプルが増大する。それを抑制する方式が図 2 に示されており、充放電モードの始点電流  $i_{ot1}$  と終点電流  $i_{ot2}$  とが同じになるようキャパシタの電圧目標値を定め、時間幅制御により各キャパシタの電圧を目標値に追従させている。充放電電流は始点と終点が等しいとき最もリプルが小さくなり、図 3 に示すように配線程度のインダクタでも十分にリプル電流を抑えることが可能である。

### 3. スイッチドキャパシタコンバータシステム

図4はPWMコンバータとGC-SCCを連携したDCグリッドシステムの構成を示している。発電機の実出力電圧が大きく変化した場合、GC-SCCを5段階に切り替え、さらに段間を埋めるようPWMコンバータを制御する。大きな電圧変化をGC-SCCが補償するため、PWMコンバータの昇圧率を最小限に抑えBoostインダクタを小型化できる。

図5は、グリッドシステムの動作をPSIMシミュレーションにより検証するための回路構成である。PSは電圧が変化する関数電圧源であり、今回はGC-SCCの特性を把握しやすいように電圧を100V~500Vと大きく変化した。

PSの後段に設けられるチョップは図4の回路のPWMコンバータを模擬している。チョップの後段にはGC-SCCコンバータが接続され、その出力を負荷に導く。制御回路はGC-SCC Cont.とChopper Cont.から構成されており、GC-SCC Cont.は入力電圧 $V_{in}$ の値を受けGC-SCCの昇圧率を設定する。

Chopper Cont.は出力電圧 $V_{out}$ が目標電圧となるようチョップを制御する。

図6は、 $V_{in}$ に対するGC-SCCおよびチョップの昇圧率の関係を示したものである。A点からB点まで移動した場合でも、大きな電圧の変化はGC-SCCが補償するため、その段間を埋めるチョップの昇圧率は最大でも1.5倍に留まっていることがわかる。

次にGC-SCC Cont.

はFig.2で示した $C_1$ 、 $C_2$ の電圧の制御ブロックに加え、昇圧率切替え時の過電流対策として2つの制御が組み込まれている。1つは昇圧率切替え時にチョップの出力側の平滑コンデンサを切り離すFilter

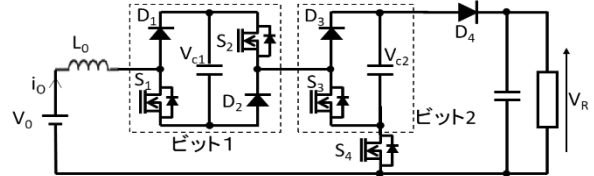


図1. 階調制御型スイッチドキャパシタコンバータの主回路  
Fig1. Main Circuit of proposed converter

昇圧率	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_R$
1.3	$V_0$	$V_0/3$	$2V_0/3$	$4V_0/3$
1.5	$V_0$	$V_0/2$	$V_0/2$	$2V_0/2$
2	$V_0$	$V_0/3$	$2V_0/3$	$2V_0$
3	$V_0$	$V_0$	$2V_0$	$3V_0$
4	$V_0$	$V_0$	$2V_0$	$4V_0$

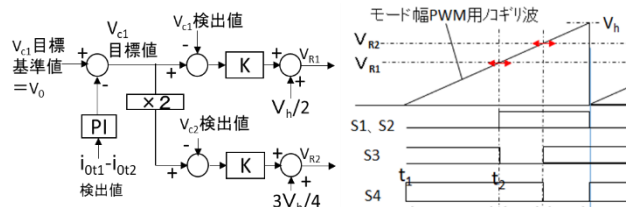


図2. 提案方式の制御アルゴリズム  
Fig.2. Control method of proposed converter

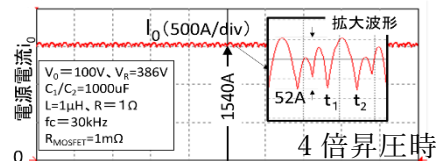


図3. 電源電流のシミュレーション波形  
Fig.3 DC current simulation waveform

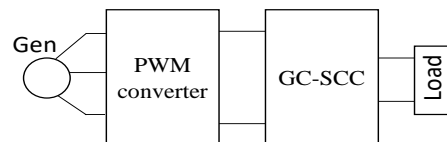


図4. GC-SCCを用いた連携グリッドシステム  
Fig.4 DC Grid System using GC-SCC

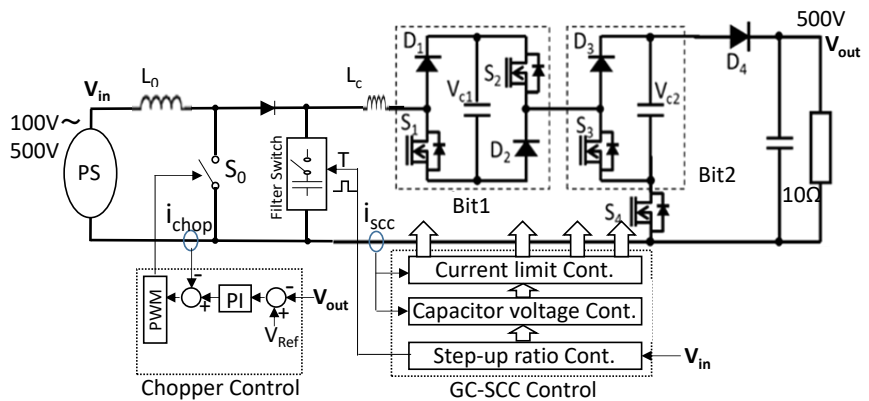


図5. 連携グリッドシステムのシミュレーション用構成  
Fig.5 Simulation diagram of the grid system with GC-SCC

Switch 制御である。昇圧率切替え時には、GC-SCC の充放電ループに大きな起電力が生じ、 $L_c$  が小さい条件では平滑コンデンサから過大な電流が流れてしまう。その対策として切替え時に平滑コンデンサを切り離し、過大が流れることを阻止する。もう 1 つは、切替え時の過電流を検知し GC-SCC コンバータの動きにリミットをかける Current limit 制御である。GC-SCC の電流  $i_{sc}$  が一定値を超えると S1~S4 のゲートを遮断し電流の上昇を抑制するよう働く。

図 7、図 8 に入力電圧  $V_{in}$  を約 1 秒かけて 500V から 100V まで下げた場合のシミュレーション結果を示している。このときの  $L_c$  の値は配線程度の  $2\mu\text{H}$  に設定した。図 7 において、切替え時の最大電流は、過電流の 2 つの対策が功を奏し、最大定常  $i_{sc}$  電流の 2 倍以内 ( $< 500\text{A}$ ) に抑えられている。また、出力電圧変動は 5% 以下に留まっている。加えて図 8 では、切替後②の定常リップル電流が  $\pm 10\%$  以下に収束していることが確認される。

#### 4. あとがき

超軽量の階調制御型の GC-SCC コンバータで構成されるグリッドシステムを提案し、PWM チョッパとの組み合わせによりグリッド電圧の安定化ができることを確認した。

#### 参考文献

(1) JAXA, 航空機電動化 (ÉCLAIR) コンソーシアム,

[http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair\\_vision.pdf](http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair_vision.pdf)

(2) 岩田, 「航空機電動化に向けたパワーエレクトロニクスへの期待」, 応用物理学会先進パワー半導体分科会第 7 回講演会, 2020

(3) H. Schefer, et al. [Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft], IEEE Access, Volume 8, 2020

(4) 2021 電気学会全国大会 WEB18-B2、4-109

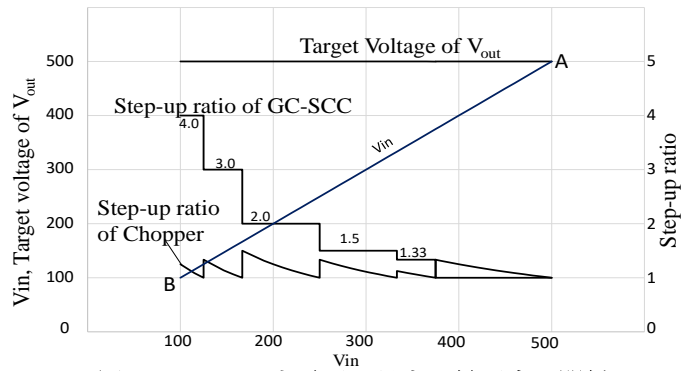


図6. Chopper入力電圧に対する昇圧率の関係  
Fig.6 Relationship between  $V_{in}$  and step-up ratios

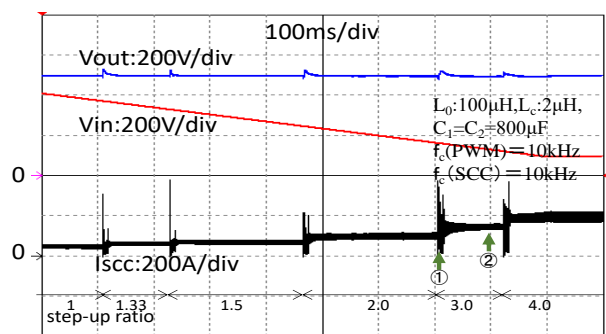


図7. 提案グリッドシステムのシミュレーション波形  
Fig.7 Simulation results of the proposed grid system

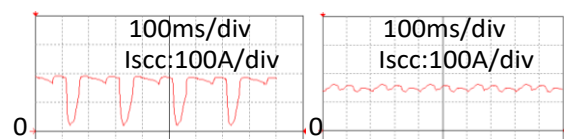


図8. 切替え時の電流①と定常状態での電流②  
Fig.8 Current waveforms of timing ① and ②