

小鹿聡士\* 笈川信一郎\*\*  
坂下友一\*  
岡村敏男\*\*

# 人工衛星用バス電圧制御器

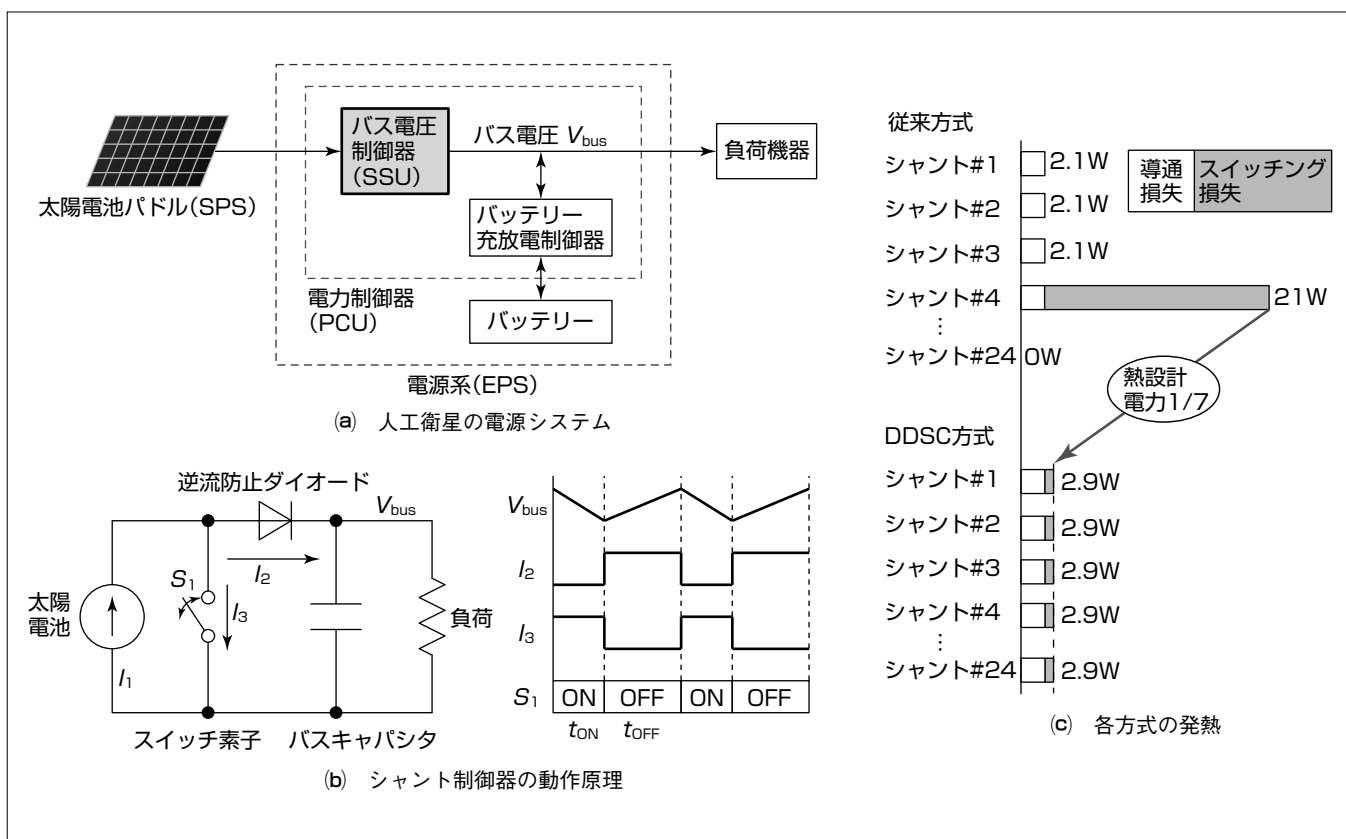
## Bus Voltage Controller for Satellite

Satoshi Ojika, Tomokazu Sakashita, Toshio Okamura, Shinichiro Oikawa

### 要旨

人工衛星は宇宙空間で動作するため、外部から電力供給ができないという特徴的な電源環境に置かれている。一般的な人工衛星は、必要な電力の全てを太陽光発電で賄っている。このような衛星電源システムは、日照時に太陽電池で発生した電力をバッテリーに蓄えるとともに搭載機器に供給し、日陰時はバッテリーを放電して電力を搭載機器に供給する。信頼性確保のため複数段からなる冗長構成をとるのが一般的であり、日照時は基本的に電力が余剰の状態となる。大型の衛星では、太陽電池をスイッチ素子によって短絡(シャント)することで余剰電力を制御し、バス電圧を安定化するSSU(Sequential Shunt Unit)が搭載されている。従来のSSUは余剰電力に応じて順次シャントをONにし、

供給電力と消費電力がバランスした段がON/OFFを繰り返すことで、バス電圧を一定に保つ<sup>(1)</sup>。一方で、ON/OFF動作を繰り返す特定のシャントに発熱が集中するという課題があった。ON/OFF動作の頻度を少なくすることで発熱を抑制することが可能であるが、バス電圧の変動が大きくなる。この二律背反の問題を解決する新方式として、個々のシャントの発熱を分散させながら装置全体で同等の制御頻度を実現するように制御信号を割り当てるDDSC(Direct & Distributed Shunt Control)方式を考案した。試算の結果、個々のシャントの最大発熱が1/7に低減されることを確認し、縮小モデル評価で電圧維持に必要な制御頻度と応答速度が確保できていることを確認した。



### 人工衛星用バス電圧制御器

(a)は、一般的な大型人工衛星の電源システムの概念図である。SSUは太陽電池からの発電電力を制御し、安定したバス電圧を負荷機器に供給する。  
 (b)は、シャント制御器(SSU 1段分)の動作原理を示す。SSUはこれを複数段組み合わせて構成される。  
 (c)は、24段構成時での従来方式と考案したDDSC方式の各シャントの発熱の比較図である。

1. ま え が き

通信・放送衛星や気象衛星を始めとした人工衛星は、我々の生活に不可欠な社会インフラとなっている。通信衛星によって、地上の電波が届かない僻地(へきち)や海上でも電話やインターネットなどの通信サービスが利用でき、災害時の緊急通信回線としても重要な役割を担っている。三菱電機の製品の1つである気象衛星は、国内外の気象予報や災害予測に役立っている。測位衛星(米国GPS(Global Positioning System)など)や地球観測衛星は位置情報や地上の画像を得ることができ、カーナビゲーションシステムや携帯電話の地図機能などで利用されているほか、地殻変動や地球環境の観測にも活用されている。

人工衛星に搭載される機器は、人工衛星自体を維持・運用するためのバス機器と衛星の用途(ミッション)に使用されるミッション機器に大別される。人工衛星の質量のうちバス機器が半分近くを占めており、バス機器の軽量化を行うことでミッション機器の質量比を高めるとともに、打ち上げコストを低減することで競争力を高めることが期待されている。バス機器の一部であり、衛星質量の1割程度を占めている電源系(Electrical Power System : EPS)でも軽量化が求められている。

要旨で述べたように、従来のSSUはON/OFF動作を繰り返す特定のシャントに発熱が集中する方式であるため、最大発熱条件で熱設計を行うと回路素子や放熱器の小型化が困難であり、軽量化を阻害する要因となっている。今回、複数段あるシャントに発熱を分散させることで最大発熱を大幅に軽減する新制御方式の開発を行った。新方式では、複数のシャントを巡回的にON/OFF制御することで発熱を均一化しながら負荷変動等に対する制御応答性を確保するため、複雑で正確な制御を行う必要がある。そこで従来アナログ回路で構成していた制御部を、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いたデジタル制御回路に置き換え、新たな制御アルゴリズムを考案・実装し、縮小モデルでの評価を実施した。

2. 従来のSSUの制御方式と問題点

SSUは太陽電池の発電電力のうち、余剰分を短絡して捨てることでバス電圧を一定に制御する、シャント方式のバス電圧制御器である。シャント制御器の動作原理を図1に示す。太陽電池に対し並列に接続されたスイッチ素子(シャント)のON/OFFによってバス電圧の制御を行う。太陽電池は電流源とみなすことができる動作点で使用する。シャントがONのとき、太陽電池の発生電流 $I_1$ は短絡されるのでバス側には流れず、バスキャパシタが負荷電流によって放電され、バス電圧 $V_{bus}$ が下降する。シャントがOFFのとき、太陽電池の発生電流は逆流防止ダイオ

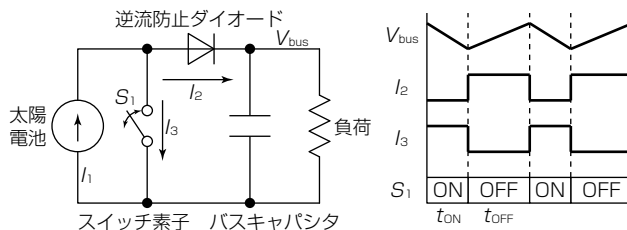


図1. シャント制御器の動作原理

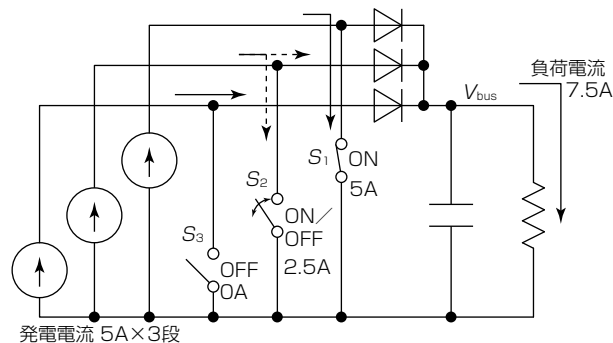


図2. シーケンシャルスイッチングシャントの原理

ドを通してバスキャパシタに充電され、 $V_{bus}$ が上昇する。シャントのON/OFFを繰り返して $V_{bus}$ の制御を行う。また、デューティ比( $t_{ON} : t_{OFF}$ )によって短絡して捨てる電力と供給する電力の割合を変化させることができる。

このシャント制御器を図2のように複数段を組み合わせ、余剰電力の大小に応じて順番にシャント動作を行うのがシーケンシャルスイッチングシャントである。図の例では、総発電電流が15Aに対して、負荷電流が7.5Aであるので、余剰電流は7.5Aとなる。よって $S_1$ を常時ONとして5A、 $S_2$ を50%デューティでON/OFFすることで平均2.5A、装置全体で7.5Aの電流を捨てることで需給をバランスさせてバス電圧を一定に制御する。この動作によって、捨てる電流の大小に応じた特定のシャントがON/OFF動作を繰り返すことになる。ON/OFF動作を繰り返すシャントでは、切替え時のスイッチング損失によってほかのシャントより発熱が大きくなる。この最大発熱条件で放熱設計を行った結果、回路素子や放熱器が大型化し、質量増大を招いている。

3. 発熱分散制御方式の検討

従来の制御方式では、先に述べたようにON/OFF動作が一箇所に集中するために発熱が集中するという問題があった。そこで、図3に示すように、個々のシャント回路を低速でON/OFFさせ、そのタイミングをずらすことで、装置全体では従来同等のON/OFF回数を得る分散方式について検討を行った。まず、このような動作を行う一般的な方式であるインターリーブPWM(Pulse Width Modulation)について検討を行ったが、段数が多くなるほど制御応答速度が遅くなるという問題があり、新たな分散スイッチング方式について検討を行った。

### 3.1 インターリーブPWM方式

シャント段数を $n$ としたときに、個々のシャントを従来の $1/n$ のスイッチング周波数で制御しつつ、均等な位相差を持たせることでリップル(脈動)を低減する方式で、チョッパ回路やPFC(Power Factor Correction)回路等で採用実績が多い方式である。

制御手順としては、図4のように制御周期 $T$ ごとに各シャントのオン時間 $T_{ON}$ を順次設定していくことで、各シャントが捨てる電流の時間平均値を制御する。この方式では、装置全体としてのリップル電流波形や制御周期は従来どおりの性能を維持しつつ、個々のシャントのスイッチングによる発熱を $1/n$ に低減することができる<sup>(2)</sup>。

一方、この方式で制御される電流は、段数 $n$ と制御周期 $T$ の積である時間 $n \cdot T$ の期間中の平均電流である。段数 $n$ に比例して個々のシャントが制御される周期が長くなるため、オン時間 $T_{ON}$ を決定してから実際に出力電流に反映されるまでに制御遅れを生ずる。制御周期を40kHzとし、制御系の安定性を確保するように制御パラメータを決定した際のシミュレーション結果を図5に示す。制御応答性能の指標として制御帯域(制御系が応答できる周波数)を用い

た。段数が増加するほど制御帯域が減少していくことが確認できる。この結果、負荷変動等に対する応答が遅くなり、過大な電圧変動を生ずる危険性がある。

### 3.2 新分散方式DDSC

インターリーブPWM方式の問題を解消するための、新分散方式の検討を行った。図6にインターリーブPWM方式と新分散方式の考え方の違いを示す。インターリーブPWM方式では、各シャント回路のスイッチング周期内で捨てる電流の平均値を制御していた。新方式では、制御周期内に全シャント回路が捨てる電流の平均値を制御することを考えた。すなわち、制御対象を電流の時間方向の平均値から空間方向の平均値に変更することで、個々のシャントのスイッチング周期に依存しない電流制御を実現し、応答性の維持とスイッチング周波数の低減を両立させる。この方式は、全シャント回路について制御周期内の駆動波形を直接的に決定し、制御周期ごとに駆動するシャント回路をローテーションしてスイッチングを分散させることで実現するため、DDSC(Direct & Distributed Switching Control)方式と命名した。

この方式では、制御周期ごとに全シャント回路の駆動パ

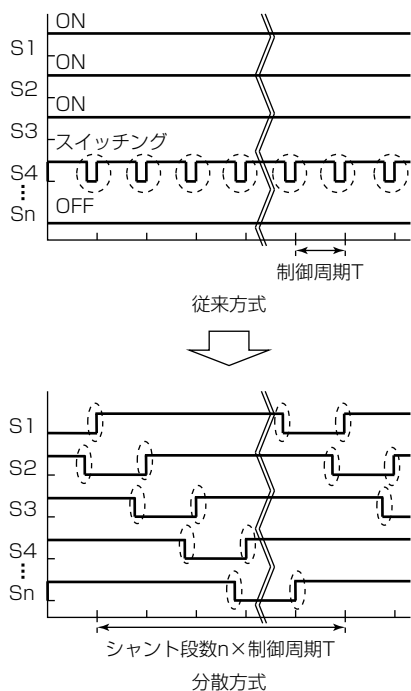


図3. スイッチングの分散化による発熱分散

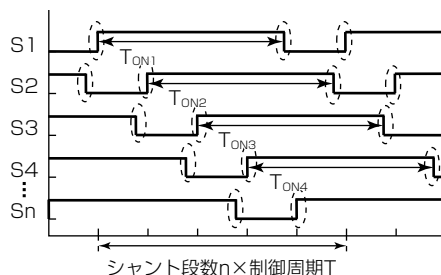


図4. スイッチングの分散化による発熱分散

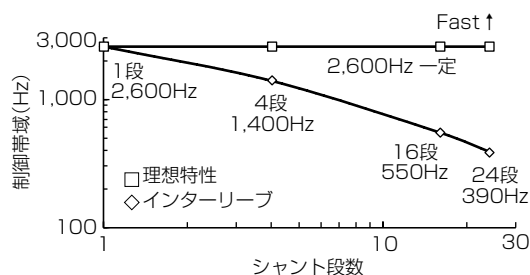


図5. インターリーブPWM方式の制御帯域

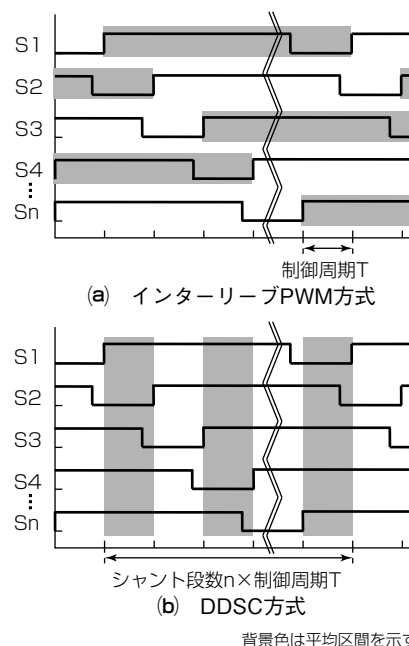


図6. 分散スイッチング方式の考え方の違い

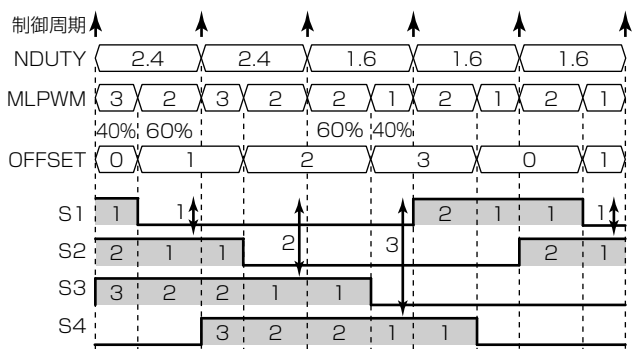


図7. DDSC方式の制御アルゴリズム

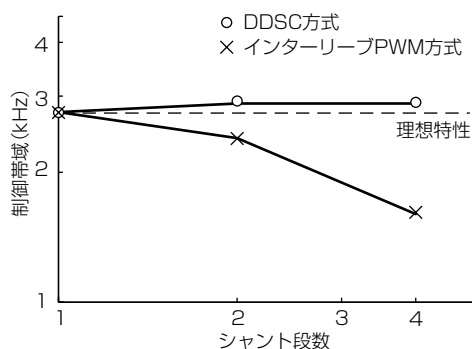


図9. 制御帯域の実機評価結果

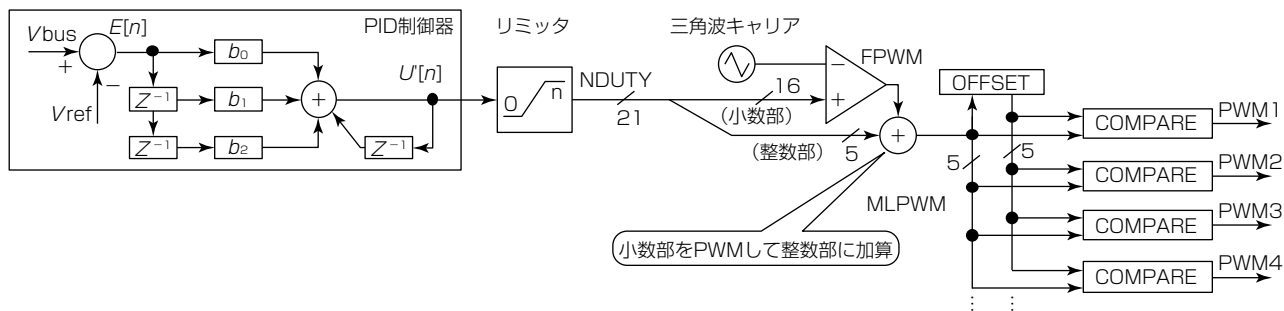


図8. DDSC方式の制御ブロック図

ターンを決定する必要があるため、既存の制御方式を使用することができず、新たに制御アルゴリズムを構築する必要があった。

考案した制御アルゴリズムと制御ブロック図を図7、図8に示す。一般的な電力変換器同様に目標値  $V_{ref}$  とバス電圧  $V_{bus}$  の偏差をPID(Proportional, Integral, Derivative)制御器に与えた。制御演算結果を整数部5 bit、小数部16bitの固定小数点形式で取り出し、小数部を三角波比較でPWM信号に変換し、これを整数部に足し合わせ、MLPWM値を生成する。MLPWM値はある瞬間に駆動するシャント回路の数を示す。さらにMLPWM値が減少するタイミングで増加するOFFSET値を生成する。OFFSET値は駆動するシャント回路の起点を示す番号である。これら2つの値を用いて各シャント回路の駆動状態を決定する。例えば、OFFSET値が1でMLPWM値が3の場合、1番目のシャント回路をスキップして3個のシャント回路をONとすることを意味する。すなわち、2、3、4番目のシャント回路をONとする。このような手順を繰り返すことで、各シャント回路が巡回して低速でON/OFF動作を繰り返しながら、装置全体では制御周期ごとに適切な余剰電力を処理することが可能となる。

この方式の有用性を確認するため、シャント回路4段の縮小モデルで実機評価を行った。フィードバック制御が安定動作するように制御パラメータを決定した際の制御帯域の測定結果を図9に示す。インターリーブPWM方式では段数の増加に伴い、制御帯域が低下しているが、DDSC方式では段数に依存しない理想特性を保っていることが確認できる。

実機で想定している24段構成で発熱の計算を行ったところ、従来方式で最大21Wであったのが、分散方式の採用によって2.9Wとなり、1/7に低減できる目途を得た。

#### 4. むすび

人工衛星用バス電圧制御器SSUの軽量化を阻害している特定のシャントへの発熱集中という課題を解消するための、発熱を分散させる技術の検討を行った。既存の分散方式であるインターリーブPWM方式では、発熱が分散して最大発熱が軽減できるものの、多段構成時に制御帯域が低下するという問題が明らかとなった。インターリーブPWM方式が時間方向の制御であることに着目し、空間方向で制御を行うことで段数に依存した性能低下が発生しないDDSC方式を考案した。24段構成時には従来方式と比較して最大発熱が1/7以下と大幅に発熱が低減できる見込みである。実機評価でも多段化による制御帯域の低下がないことを確認した。この方式の採用によって、発熱の分散と制御帯域の両立が可能となり、装置の軽量化が実現できる。

#### 参考文献

- (1) Kuwajima, S., et al.: Digital sequential shunt regulator for solar power conditioning of engineering test satellite(ETS-V), Power Electronics Specialists Conference 1988(PESC '88), IEEE (1988)
- (2) 岡村敏男: 電力制御器, 日本国公開特許公報, 特開2014-71554