

学 位 論 文 要 旨

題 目 ホールスラスタのワイドレンジアノード電源の小型化に関する研究

氏 名 松永 芳樹

ホールスラスタをはじめとする宇宙用電気推進は古くから人工衛星・探査機の姿勢制御や軌道変更のための推進器として幅広く活用されてきた。宇宙分野における電気推進とは電力によって推進ガスを加速し排気することで推力を得る推進器のことであり、化学反応によるエネルギーによって燃焼ガスをノズルで膨張し加速させる化学推進と比較すると、推力は小さいが比推力と呼ばれる燃費に相当する指標において優れており、推進ガスを節約することができる。電気推進に置き換えることで推進ガスの搭載量を削減でき、ミッション機器を増やしたり、より小型の衛星で同じミッション機器を搭載したりできるというメリットがある。電気推進にはヒーターで推進ガスを温める伝熱型と、キセノンなどの希ガスや、ヨウ素などの昇華性のものをプラズマ化させ発生したイオンを電場によって加速する静電加速型と、同じく発生したイオンを電場と磁場によって加速する電磁加速型に分類される。静電加速型の電気推進は、方式としてはホールスラスタやイオンスラスタなどがあり、化学推進や伝熱型の電気推進と比較して推力は小さいもののより高い比推力のおかげで燃料が削減できるため、長い運用期間が求められる静止衛星の姿勢制御で活用されてきた。

近年、静止衛星の大電力化が進んだことにより、すべての推進器を電気推進に置き換えた全電化衛星が登場した。全電化衛星は地球低軌道から静止軌道への軌道投入と、その後のおよそ15年もの運用期間の間の姿勢制御をすべて電気推進で行う。この全電化衛星にホールスラスタが数多く採用されている。その理由は、ホールスラスタの長所はイオンエンジンよりも推力電力比と呼ばれる、電力当たりの推力が大きいこと、軌道投入にかかる期間を短くできることと、動作に必要な電源が少ないのでこれらをひとまとめにした Power processing unit (PPU) が小型になることである。

ホールスラスタの PPU は、推進ガスを電離させ生じたイオンを加速するためのアノード電源と、磁場を発生させるためのコイル電源と、カソード内部の電子放出材料を加熱するためのヒーター電源、カソードから電子を引き出すための電圧を印可するためのキーパー電源、推進ガスの流量を制御するための流量制御電源の5つの電源そしてこれらの電源を制御する制御部からなる。これらの中での推進ガスの電離とイオンの加速のための放電電力と呼ばれる電力を供給するのがアノード電源で PPU の供給電力の大部分を占めている。アノード電源は定電圧電源であり供給する電圧をアノード電圧と呼び、アノード電圧が高いほどイオンは加速され比推力が上昇する。アノード電源が供給する電流を放電電流と呼び、推進ガス流量を増やすと電離が増え推力が増えると共に放電電流も増える。放電電流は電離と推進ガスの供給の繰り返しにより不安定に振動しておりノイズ源となるため放電フィルタをホールスラスタと放電電源の出力端との間に挿入するのが一般的である。

ホールスラストの PPU、特にアノード電源に対する新たな要求は出力電圧設定の拡大である。従来のホールスラストのアノード電圧は 300V であったが、高批推力動作のための 600V 以上の動作状態を可能にするホールスラストの研究開発が世界的に進んでいる。しかも電力としても既存のものは放電電力が 4.5kW だが最新のものは 6kW まで大電力化している。そのようなトレンド中で日本でも 300V 動作の 6kW ホールスラストの研究開発が行われ技術試験衛星 9 号機で実証予定である。その先を見据えて 600V 動作の追加、さらにはより大推力を動作状態も追加した 175~800V の動作状態を可能にしたマルチモード 6kW ホールスラストの研究が進められている。これらに対応した広い出力電圧設定が可能なワイドレンジアノード電源の実現が必要である。

従来のフライト実績のあるホールスラスト PPU のアノード電源は 300V 出力設定の 1.5kW や 2.5kW のコンバータを 3 つあるいは 2 つを並列に接続することで 300V4.5kW を出力していた。ワイドレンジアノード電源では 4 台の 1.5kW コンバータをリレーによって切り替えることによってワイドレンジ出力を実現するが、リレーユニットの追加により容積と重量が増えてしまうため、1.5kW コンバータの容積の小型化が必要で、検討の結果、フライト実績のある PPU の 1.5kW コンバータと比較して容積を 30% 小さくしないといけないことが分かった。これが課題の 1 つ目である。

大きな振幅の放電電流振動を許容しようとするすると放電フィルタのサイズは大きくなる。そのため、ワイドレンジアノード電源の 1.5kW コンバータを目標のサイズに収めるため最低限の放電フィルタしか搭載していない。放電電流振動の振幅の大きさはホールスラストの磁場に強く影響を受けるため、マルチモード 6kW ホールスラストの動作試験において放電フィルタの仕様上限以下になるように磁場条件は検討される。しかし、地上試験では十分安定だった磁場条件でも、軌道上の環境やホールスラストの寿命劣化によって、放電フィルタの仕様上限を超える電流振動が発生する可能性がある。そのような場合に備えて、フライト実績のある PPU では振動が仕様上限異常になった場合にスラストを停止する機能を有する。しかし、同様の機能ではワイドレンジアノード電源では電流振動の仕様上限と実動作の間のマージンが少なく停止が頻発してしまうため、放電電流振動を監視し、仕様上限になる前に磁場を調整して振動を抑制する機能が求められる。これが 2 つ目の課題である。

そこで本論文では、上述の課題を解決するため、ワイドレンジアノード電源の小型化のためのコンバータ構成について提案し、製作した 1.5kW コンバータがフライト実績のある PPU コンバータ容積の 30% 減以下の容積であり、ワイドレンジアノード電源として 6kW ホールスラストを安定して動作できることを示す。次に、放電電流振動を監視し、仕様上限になる前に磁場を調整して振動を抑制するための機能について述べる。放電電流振動の不安定化をとらえるために仕様上限を超える放電電流のピークをカウントする振幅検出システムを提案する。次に検出値が振幅の仕様上限を下回るように磁場を変更する制御アルゴリズムを提案する。最後にワイドレンジアノード電源と 6kW ホールスラストの組み合わせ試験において振幅検出システムと制御アルゴリズムが正しく動作することを示す。

第 1 章は緒論である。まず、本研究の背景やホールスラストの動作メカニズムと必要な電源、およびフライト実績のある PPU について述べる。そしてマルチモード 6kW ホールスラストのためのワイドレンジアノード電源について、必要な機能、小型化のためのアプローチを示し、最後に課題を明らかにする。

第2章では、100V入力を昇圧し300Vと600Vの2つの電圧設定で出力するワイドレンジアノード電源の小型化のためのフルブリッジインバータと倍電圧整流部を用いた出力電圧設定300Vの1.5kWコンバータについて述べる。このフルブリッジインバータと倍電圧整流部を用いた出力電圧設定300Vの1.5kWコンバータのBreadboard Model(BBM)を製作し、フライト実績のあるPPUのコンバータ容積の30%減の $4.69 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 以下が達成可能であることを示す。最後に、2台の1.5kWコンバータBBMを2台並列に接続した構成において効率、電圧リップル、EMI規格など標準的な仕様を満たしつつ、6kWホールスラストを安定して動作できることを示す。

第3章は、入力電圧100Vを昇圧して、175~800Vの電圧設定範囲で出力可能なワイドレンジアノード電源の小型化のための1.5kWコンバータの回路構成とその設計基準について述べる。このワイドレンジアノード電源では1.5kWコンバータではフルブリッジインバータと全波整流部の構成を用いる。フルブリッジインバータと全波整流部からなる構成を用いるにあたっての課題は、1.5kWコンバータサイズをフライト実績のあるPPUのコンバータ容積の30%減の $4.69 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 以下に抑えるために出力フィルタの容量が制限されるということと、制御ボードの小型化のためにデジタル制御を採用するが宇宙用の半導体部品はそれほど性能が高くなく、制御にむだ時間が生じコンバータが不安定化するという2つの制限があることである。そこでそれらの制限を許容するための設計基準を提案し、それに基づいて製作した4台の1.5kWコンバータからなるワイドレンジアノード電源が6kWホールスラストを幅広い出力電圧設定で安定動作させることを確認する。

第4章ではスラスト、ワイドレンジPPU、衛星を過大な放電電流振動から保護するための制御について述べる。まず、放電電流振動の振幅を正確に検出するための振幅検出システムの回路構成と仕組みと課題について述べる。そして課題を解決するための予測モデルと検出アルゴリズムを明らかにし、製作した振幅検出システムが正しく振幅を検出できることを6kWホールスラストを使用した試験で確認する。次に放電電流の振幅が仕様上限を下回るようにコイル磁場を制御するための振動抑制制御を提案する。振動抑制制御は、定電力制御と推進効率最大化制御が行われている間に放電電流振動が激しくなった場合、これを抑えるよう働かなければならないので3つの制御を統合した制御アルゴリズムを考案した。6kWホールスラストを使用した試験で提案の制御アルゴリズムを動作させ、振動抑制制御、定電力制御、推進効率最大化制御が正しく動作しているか確認する。

第5章はまとめである。本研究を総括し、今後の展望を述べる。ワイドレンジアノード電源を含むマルチモード6kWホールスラストは、衛星システムは衛星のサイズを変えずに、より大規模なミッション機器を搭載できるようになり、通信の大容量化による衛星通信のより一層の普及や、より大規模でより遠方の目標への有人探査ミッションの実現など人類の生活の向上と活動領域の拡大に寄与することができる。