

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	宇都宮大学 工学部 基盤工学科 情報電子オプティクスコース
職位または役職	助教
氏名	春名 順之介

1. 研究題目

パレートフロントカーブと3レベルインバータによる航空機用発電システムの最適化

2. 研究目的

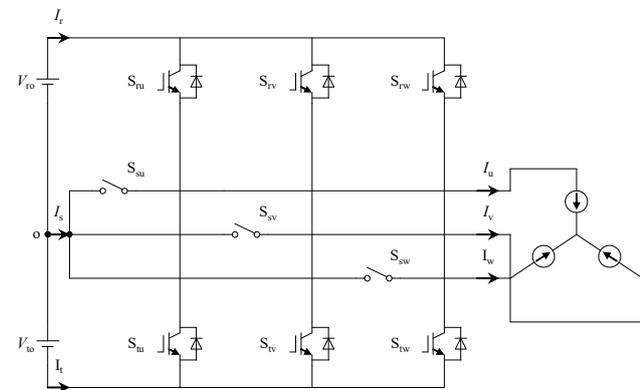
近年、航空機産業の需要拡大と共に、航空機内の電力需要量が増大している。航空機のジェットエンジンは推進と発電を兼ねており、電力需要量が増大していくと、現行の発電システムではジェットエンジンの負荷に対して発電量が非常に大きくなり、安定的な電力供給や航行に影響を及ぼす可能性がある。そこで、ジェットエンジンの改良も含めた航空機のさらなる電力の高出力化と、電力変換器を用いた航空機内の電動化が検討されている。本研究では電力変換器を積極的に活用した、航空機の電力高出力化、および、電動化を検討する。航空機の電力システムは一般的な商用システムと比較すると、システムの小型化を狙って周波数が高く設定されている点、および、上空飛行時の空気の薄さに起因して絶縁耐力が低いことから低電圧大電流系であることが知られている。さらに、搭載体積、重量は航空機の航行性能に大きく依存することから、電力変換器には効率の高さに加え、重量と体積の低減が大きく求められる。

以上をふまえ、本研究は高周波数、低電圧大電流系に対応した航空機用電力変換器の高効率、小型、軽量化の達成を目的とする。

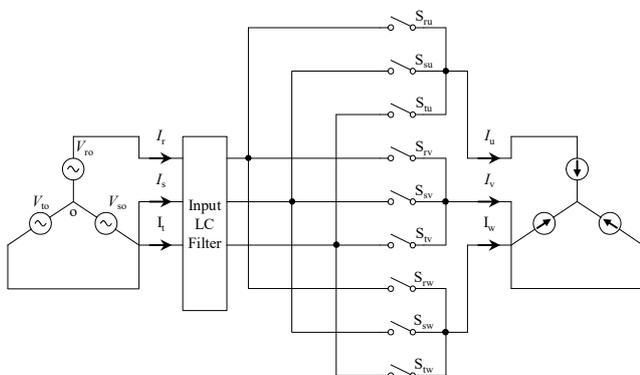
3. 研究内容及び成果

本研究では、航空機用電力変換器に T 型 3 レベルインバータ(図 1(a))の適用を目指し、その制御方式、および、航空機への搭載を考慮したときの重量と体積について検討することを目的としている。本年度においては、主に制御方式について検討している。3 レベルインバータには直流電圧リップルの変動という課題が存在しており、これまで種々の直流電圧リップル抑制方式が検討されてきたが、航空機用電力変換器に適用する場合、従来のインバータとしての仕様と比較すると、直流電圧リップルを完全に抑制する必要がある。これに対して本研究では、航空機の直流電圧リップルを完全に抑制するために、マトリクスコンバータ(図 1(b))の空間ベクトル変調を応用して 3 レベルインバータの制御を改善する。これまでに報告されているマトリクスコンバータの空間ベクトル変調(従来制御)に対し、本研究の成果として、従来制御には使用されていないスイッチングパターンを新たに追加した上で 3 レベルインバータに適用し、その特性を検証した。従来制御は、モータ駆動を主目的として出力電圧ひずみの低減に特化した制御となっており、あらゆる負荷力率での出力電圧と入力電流の同時制御を実現する方式となっていることから、本研究で提案する航空機のエンジン発電機を電源として 3 レベルインバータを回生動作して直流電圧を生成する変換回路に求められる性能を一応は満足している。しかし、本研究で問題となる直流電圧リップルを抑制するには、入力電流を改善できるようなスイッチングパターンの考察が必要となる。そこで本研究では、従来制御で使用されていなかったすべてのスイッチングパターンをあらゆる動作条件で検討することで、直流電圧リップルを抑制できるかを検討している。加えて、本研究では航空機内の電力需要を鑑み、2 つの直流電源の負荷電力が平衡でないアンバランス状態においても、安定した直流電圧を供給できる制御を考案し、あらゆる負荷状態に対応した制御を検討する。

図 2 にシミュレーション結果を示す。図 2 は直流電圧を 540V に制御し、それぞれのコンデンサに 1.5Ωの抵抗負荷を接続している。また、上から順に中性点電流(A)(ただし、ローパスフィルタによる観測、動作周波数はキャリア周波数の 1/10)、上側コンデンサ電圧(V)(黄)、下側コンデンサ電圧(V)(紫)を示している。このシミュレーションでは、初期状態で上側コンデンサの電圧を 324V、下側コンデンサ電圧を 216V というアンバランス状態としている。提案する入力力率制御によって、0.2sec 程度でアンバランスが解消されており、提案制御の有用性が確認できる。次に、0.4sec で下側コンデンサに接続されている抵抗値を半分に切り替えている。これにより過渡的に電圧のアンバランスが発生するが、提案制御によって中性点電流が負方向に流れるよう入力力率が調整された結果、負荷アンバランスがある状態においても、直流電圧がバランスすることが確認できる。以上の結果より、提案制御が電圧アンバランス、負荷アンバランスのいずれの状態にも対応可能であることが確認できる。



(a) 3-level T-type inverter.



(b) Matrix converter.

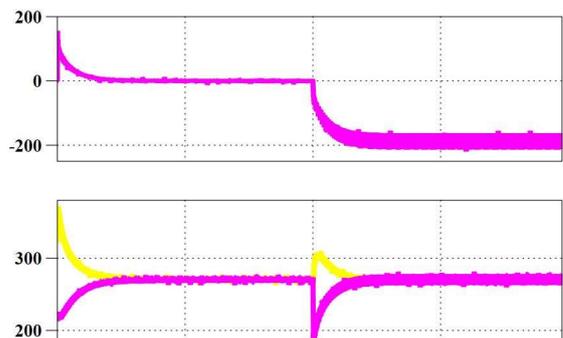


図 2 シミュレーション結果

図 1 3 レベル PWM 電力変換器と三相/三相マトリクスコンバータ

4. 今後の研究の見通し

本年度実施した航空機用電力変換器の制御に関しては、3レベルインバータにマトリックスコンバータの制御を応用する点、航空機用の電力需要に即した負荷のアンバランスに対応する制御の2点を導入することにより、航空機の発電機が発電した電力から2つの直流電源に電力変換を行い、あらゆる負荷の状況に対応し、かつ、直流電圧リップルのない安定した直流電圧の生成が可能となった。したがって、航空機用電力変換器として3レベルインバータを適用する際の制御に関する基礎検討は十分に行えたと言える。しかしながら、フィードバック制御のゲイン設計などは試行錯誤的に行っている点があることから、電力変換器全体の設計と合わせて、制御設計についても今後検討していく必要がある。

一方、航空機電力変換のシステム全体について見ると、今後検討していく要素は大きく2点存在し、一つは航空機用発電機と電力変換器の連系方法、および、重量と体積の検討である。

航空機用発電機と電力変換器の連系方法については、発電機側、電力変換器双方から連系方法について検討する必要がある。電力変換器については、故障時の冗長運転が可能のように、電力変換器を複数接続する方法が考えられる。電力変換器の複数接続には冗長運転以外にもメリットが存在し、発電機の高回転数が低い状態において電力需要が増大したときの大電流出力に対応することが可能となることなどがあげられる。しかし、一般的にインバータの複数接続時にはインバータ間に過大な電流が流れる「横流」を抑制するために連系リアクトルを使用する必要がある。リアクトルは装置の重量・体積の両方を大幅に増大することから、横流抑制にはリアクトル接続以外の方式を検討する必要がある。本研究ではインバータを複数接続する点、および、横流を抑制できることの両方を満たす方式について、発電機の巻線を分割することによって実現できるかを検討している。発電機の巻線を分割する研究については種々の方式が検討されているが、本研究で使用する3レベルインバータとの連系、特に先述の横流抑制効果については今後検討していく必要がある。

重量と体積の検討については、パレートフロントカーブを用いて検討することが有効である。パレートフロントカーブとは、電力変換器のスイッチング周波数をパラメータとし、電力変換回路方式と、回路を製作したときの電力変換容量あたりの体積・重量を算出することによって体積と重量の両方を同時に最適化していく手法である。本研究ではこれまでに、2レベルインバータと3レベルインバータの2種類の電力変換器について、パレートフロントカーブによる体積と重量の評価を行ってきたが、本研究で検討している3レベルインバータは直流電圧リップルの抑制を行わないと体積、重量が大幅に増加してしまう問題があることがわかっていた。しかしながら、本年度の研究成果によって直流電圧リップルが完全に抑制できる制御が提案できたことから、今後は電圧リップルが抑制された状態においてパレートフロントカーブを検討し、航空機用電力変換器の体積・重量を検討していく必要がある。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

春名順之介・吉原征貴・船渡寛人：「3レベルPWM整流器における電圧アンバランス、負荷アンバランスに対応可能な入力力率制御」、2021年電気学会産業応用部門大会、1-19, pp.I-81-I-84 (2021)

Junnosuke Haruna, Masato Wakabayashi, Masaki Yoshihara, Hirohito Funato : "A Consideration on Neutral-Point Potential Balancing of 3-Level PWM Rectifier Applying Space Vector Modulation of Matrix Converter", 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), II5-2042, pp.1-5 (2021)