

論文の内容の要旨

論文題目 航空機・エンジン電動化システムの信頼性向上に関する研究

氏 名 大依 仁

1. 本研究の目的

航空輸送需要の増加に伴う航空産業のグローバルな成長・発展と、地球環境問題への意識の高まりや燃料価格の高騰は、エネルギーの有効活用や効率改善を実現する航空機の技術革新への要請となっている。その技術革新を担う航空機の電動化は、パワープラントと各制御システムがワイヤによりエネルギーの授受を行い、半導体化されたエネルギー変換システムを介在させて制御することにより、従来のシステムでは実現困難な制御システムの構築を可能とする。まず、ボーイング787やエアバスA380では環境制御装置の電動化やスタータジェネレータおよび電気油圧式アクチュエータが採用され、搭載計算機と電力変換の連携により、エネルギーの最適化（高効率化やより高度な電力安定性の向上等）が図られた。

今後、航空機の全電動化が達成されたならばエネルギーの最適化にとどまらず、エネルギー供給のための複雑な油圧系統、空気圧系統、機械式機構が不要になり、設計自由度の向上、整備性の向上及び重量軽減ができ、設計自由度の向上はシステムの多重化を容易とし、信頼性や生存性の向上を図ることができる。しかしながら、エンジン補機やフライト・コントロールアクチュエータなどは全電動化されていない。本研究の着目点は航空機の信頼性や安全性を高めるところにあり、航空機・エンジンの信頼性向上と全電動化を実現するために必要な、輸送システムとして超えるべき技術課題を抽出し、その解決を図ることを研究の目的としている。

航空機・エンジンの信頼性向上の主題である航空機システムの安全において、あらゆる事故は回避されなければならないが、すべての故障を回避することはできない。回避できない故障には、摩耗故障以外に偶発故障を考慮すること、潜在する未知の現象や必ずしも設計通りにならない事象へ対処すること、さらに、全体システムの安全を保つために他のシステムが生ずる故障を受容し制御することなどがあげられる。一方、故障や損傷を理論的に回避する方法がある場合でも、重量増加やコスト高は航空機設計では総合的に不適切なものとなることも考慮する必要がある。航空機・エンジンの構造安全性では、作用する荷重との間で適切なバランスを必要とし、定期検査における構造物に存在する危険値以内のキズを損傷許容の設計手法により容認している。

また、航空機システムを含む輸送システムにおける安全は、機能的な工夫により極力安全を確保する設計とすることで達成する。その設計は安全を認証する規格と法令をその拠り所とし、設計様式としての冗長設計もそこに含まれる。加えて、エンジンや機体飛行制御に必要な航空機の電動ポンプ、電動アクチュエータの冗長設計は、瞬時でも動力が途切れることが急速な燃料吐出停止や舵角の急速な変化を発生し、致命的なシステムフェールに至る可能性があることを考慮しなくてはならない。

2. 従来技術と課題

安全性・信頼性設計の対象となる電動化システムの故障モードは、機構部のジャミング、機械部品の疲労・摩耗、電気・電子部品の故障に大きく分類される。疲労・摩耗には適切なメンテナンスやオーバーホールが必要であり、その他は故障を許容するための冗長構成が必要である。電気電子部品の冗長設計は一般的となっているが、機構部のジャミングと、その対策としての冗長方式は電動化特有の課題として未だ解決されていない。本研究では、その対策として機械機構を使用しない冗長方式と耐ジャミング性を有する機械機構による冗長方式を研究の対象とした。これらの方式は電動モータ出力の減速の要否により、機械機構を使用しない冗長方式は減速器が不要な燃料ポンプを、耐ジャミング性を有する冗長機構は減速器が必要な電動アクチュエータをその適用先としている。

さらに、本論文ではこれらの課題の解決を図るとともに航空機搭載を考慮した、部品点数の低減、ジャミング箇所の削減、故障遷移時間の短縮を耐故障設計のコンセプトとして提案し、具体的な手法について問題点を示した。部品点数の低減には、一故障で全システム損失となる系並列冗長ではなく、要素並列冗長や部分運転による応急運転の組み合わせで信頼性を向上させる方法が必要である。ジャミング箇所の削減では、冗長機構にトルク加算（トルクサミング）を採用すれば、クラッチによる切り離しが必要であるがクラッチ機構自体の信頼性や重量増が問題となるとともに、最終段にジャミングの課題が残る。一方、速度加算（速度サミング）機構を採用すれば、機構の上流で発生したジャミングに対してはクラッチ機構なしで運転継続が可能であるが、一般的な差動ギヤによる速度サミングでは部品が増加するとともに、構成するギヤ自体が固着する要因が残るという問題点がある。故障遷移時間の短縮には、切り替えが不要という特徴を有するアクティブ／アクティブ制御が、アクティブ／スタンバイ制御（待機冗長）よりも瞬断回避に適している。さらに、アクティブ／アクティブ制御は、正常時には並列冗長系統がすべて稼働することで負荷分散がはかれ、損失を低減しシステム全体の効率改善に寄与する技術である。しかし、電動システムで故障後に瞬断なく冗長性が機能する具体的な

実現方法が必要である。本研究では新たなシステム提案のために、これらの課題の解決をはかる。

3. 本研究で得られた知見

従来の技術と課題を踏まえ本論文の第3章で航空機エンジン電動燃料ポンプシステムの信頼性向上、第4章では航空機エンジン可変静翼電動アクチュエータの信頼性向上についてまとめた。

3.1 航空機エンジン電動燃料ポンプの信頼性向上に関する成果

第3章ではエンジン電動燃料ポンプでワンフェールオペレーショナル/ツーフェールセーフを実現する冗長方式を提案した。冗長構成の二つの巻線の、片側が故障すると瞬時に正常な巻線の電流を2倍に増やすことができるアクティブ/アクティブ制御方式による電流制御技術である。二つの巻線の電流を加算して電流サーボにフィードバックすることで、ワンフェールオペレーショナルにおいて電流低下を瞬時に補完し制御できない故障許容時間を短縮する(図1)。さらに応急運転システムとして、3相モータの1相が故障しても残りの2相で電流位相を制御するフェールセーフシステムを付加する。3相モータは、1相故障時に楕円状の電流ベクトルとなるが、円形の電流ベクトルになるよう位相制御を行い、スムーズな回転数制御を可能としている。以上の方法を明示し、試験結果によってその実現を確認した。

また、電動化に不可欠な電源の検討を行い、エンジン始動時の回転数からテイクオフ時の最高回転数までの広速度範囲で、所要の電力を発電する永久磁石発電機の研究について述べた。従来の航空機用発電機は界磁電力発電機、固定子から回転子へ界磁電力を伝達する発電機、界磁電力を使った主発電機の3つの発電機で構成されているため、発電電圧が回転数の三乗に比例する点で広い速度範囲での運転には不利であり、発電電圧が回転数に比例する永久磁石発電機が有利である。しかし、従来の発電機は界磁電流で出力電圧を制御でき、負荷側および発電機内で短絡故障等が発生した場合には、発電機制御装置により発電機の出力電流を監視し、異常時には界磁電力を遮断することで発電を停止できる。永久磁石発電機の場合は、この遮断機能の代替が課題であった。本研究では永久磁石発電機に遮断機能を持たせるため、中性点遮断方式を研究し、永久磁石発電機内部での短絡故障で電流を遮断する方法を実験によって実証した。

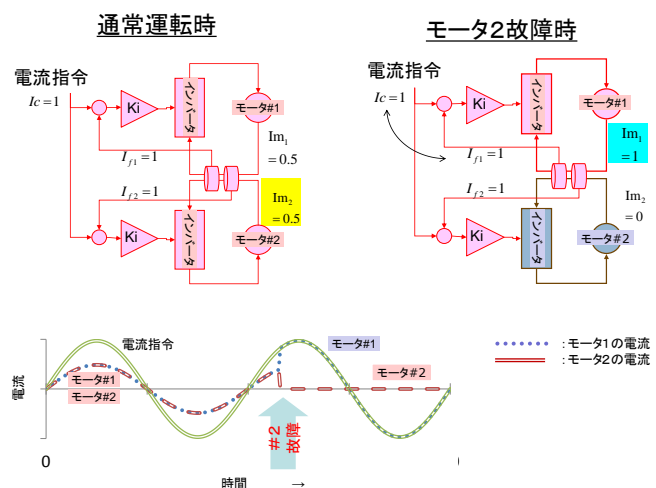


図1 多重巻線モータの電流制御

3.2 航空機エンジン可変静翼電動アクチュエータの信頼性向上に関する成果

電動アクチュエータでアクティブ／アクティブ制御とともに、ジャミングを回避するための冗長突き合わせ方式として速度サミング方式を選定し、その実現課題を明らかにし、リニアアクチュエータのボールスクリュウ速度サミング方式を提案した。出力軸の速度が2つの入力軸の加算となるようにボールスクリュウで構成した機構で速度サミング機構を構成し軽量化を図るものである。

ボールスクリュウのリードとナットの回転方法を逆回転させて回転／直動変換を行うことにより、従来速度サミング機構として用いられた差動

ギヤを使わずにシンプルで信頼性の高い、且つギヤのジャミングの回避・分離を完全に達成する方式として提案した(図2)。また、速度サミング方式において課題であるモータがトルク喪失を起こした場合の制御方法について、一般的な機械ブレーキ式を用いず、回生制動による保持にて速度サミングアクチュエータの制御が可能であることを実験によって実証した。

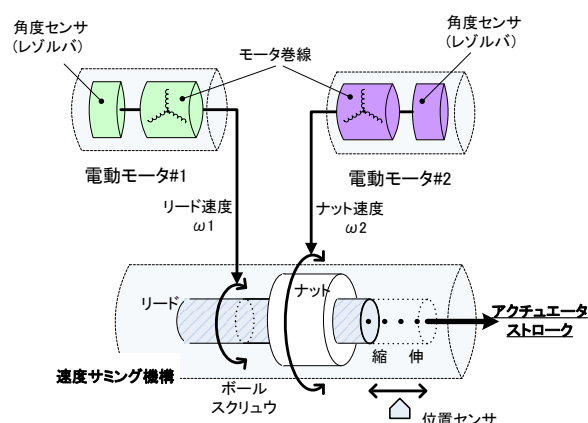


図2 速度サミングの機構原理

4. まとめ

本論文は、航空機・エンジンシステム的全電動化の研究要素として、クリティカルな部分であった耐ジャミング性を抽出し、解決する手段を明示し、且つ瞬断を生じないシステム手法を提案することで、今まで実現できなかった航空機・エンジンの燃料ポンプやアクチュエータの冗長・耐故障設計の適用を可能とし、歴史的に油圧・機械式であった航空機・エンジンシステムを電動化することによって、信頼性や安全性のパラダイムをシフトすることに貢献できるものと考えている。また、これらの技術が航空機の安全・安定な運航に寄与すると共に、航空機に限らずさまざまな電動化システムの安全性・信頼性の向上に貢献することが期待される。