

多相モータ/インバータを用いた冗長駆動システムによる電動航空機用モータの高出力化と高信頼性の両立

長岡技術科学大学 工学研究科 電気電子情報系*

日高 勇気

1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現のため、電動航空機が着目されている。電動航空機用モータ駆動システムでは、故障による動作不良が人命に直結するため、故障時にも正常時と遜色ない動作をする、冗長性を持った駆動システムが求められている。ゆえに、耐故障性が利点となる多相モータの需要が高まっている¹⁾。多相モータの耐故障制御に関する先行研究として、故障時のトルクレベル維持²⁾（以下、従来法 A）や、トルクリップル抑制³⁾（以下、従来法 B）を目的とした成果が報告されている。従来法 A では、非故障巻線に通電する電流の位相を逆起電力となるべく揃えることで、トルクレベルを維持している。一方、逆相成分トルクを多く発生することから、トルクリップルは大きくなる。また従来法 B では、故障時のトルクリップル増加の要因となる逆相成分トルクを相殺し、トルクリップル抑制を実現している。一方、非故障相に通電される電流の位相と、逆起電力の位相がずれるため、トルクレベルが低下する。先行研究で提案されている手法では、トルクレベル維持とトルクリップル抑制が両立できていない。

上記先行研究の課題を解決するために、本研究では非故障相に逆相成分を重畳する、逆相電流重畳法を提案する⁴⁻⁶⁾。産業機械の高機能化を目的として、運動制御用計算機を設計した。故障時に発生するトルクリップルは、各相電流のアンバランスによって生じる逆相成分に起因する。そこで、対称座標法を用いて、故障時に発生する零相成分、正相成分、逆相成分を算出する。非故障相に逆相成分を相殺する振幅・位相の電流を重畳することで、故障時のトルクリップルを抑制する。また、提案法では逆相成分を相殺するために、零相成分を活用する。結果、提案法では正相成分を損なうことなく逆相成分を相殺でき、トルクレベル低下を抑制できる。本報告では、様々な負荷条件で提案法の有効性を明らかにする。また、試作モータを用いた実機検証を行い、実機電流波形でも提案法が有効か明らかにする。第 2 章では、従来法及び提案法の電流制御について記述する。第 3 章では、様々な電流条件および複数のモータモデルでの数値解析を行い、提案法に対する負荷による影響を明らかにする。第 4 章では、実機での測定を行い、数値解析で得られた結果と比較することで、提案法の実現性について検討する。

2. 提案電流制御法

従来法及び提案法の電流フェーザについて記述する。正常時の電圧・電流ベクトルを図 1(a)に示す。電流は A 相を基準とし $2\pi/5$ 間隔で通電される。以降、A 相を故障相とし、B~E 相へ通電する。この時、全手法で銅損が揃うように係数を決定する。従来法 A の電圧・電流ベクトルを図 1(b)に示す。従来法 A は、トルクレベルを最大限維持できるが、トルクリップル増大要因である逆相成分が発生し、トルクリップルは大きくなる。

*2025.4 より立命館大学理工学部機械工学科に所属

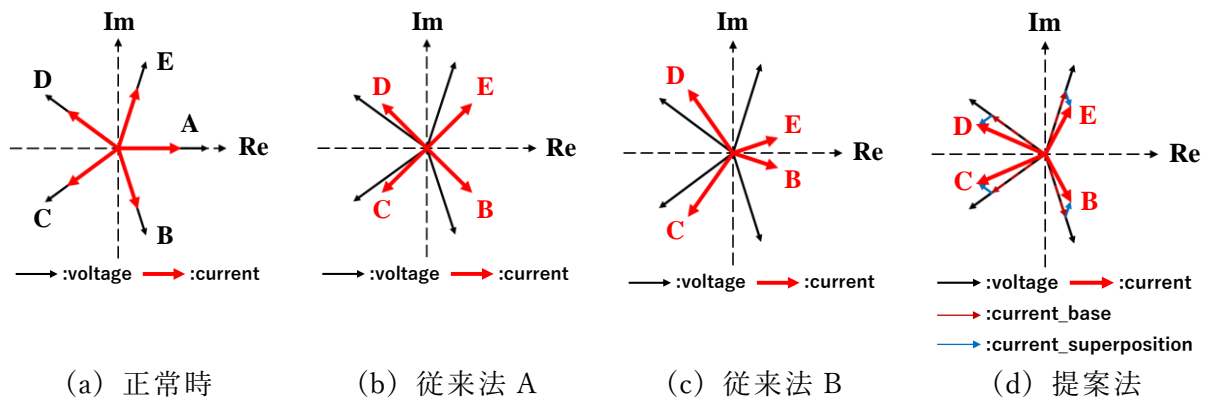


図1 従来法と提案法の電流フェーザの比較

従来法 B の電圧・電流ベクトルを図 1(c)に示す。図 1(c)から、特に B, E 相で誘起電圧と電流のベクトルがずれているため、トルクレベルが低下すると考えられる。提案法の電圧・電流ベクトルを図 1(d)に示す。図 1(d)より、従来法 B に比べて、誘起電圧/入力電流ベクトルの位相ずれが大幅に少なくなっていることがわかる。従来法では零相電流を用いないため、逆相成分を相殺するには正相成分を犠牲にする必要がある。一方、提案法では正相成分を維持しつつ、零相成分を用いて逆相成分を相殺する。ゆえに、トルクリップルの低減とトルクレベルの維持の両立が可能である。ただし、零相電流を使用する条件として、各相の巻線が全て独立している必要がある。

3. 数値検証

数値検証に用いた解析モデルを図 2 に、モータ仕様及び解析条件を表 1 に示す。本モデルでは、電動航空機に広く用いられるモータ方式を選定しており、同モータで検証することで提案する電流制御法の電動航空機仕様での適性が確認できる。また、実機検証を予定しているため、出力帯を実験装置に合わせて調整し、連続通電可能な電流条件を、予備検証によって選定した。本章では、図 2 のモデルに数値解析を適用し、従来法及び提案法の故障時の磁気特性を算出する。

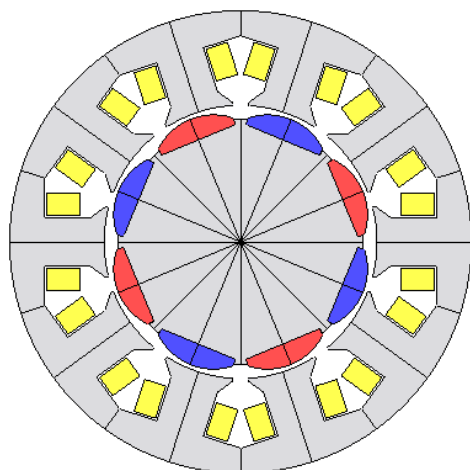


図2 数値解析モデル

表1 モータ仕様及び解析条件

Stator	Outer diameter (mm)	Φ85.0
	Inner diameter (mm)	Φ50.2
	Thickness (mm)	100.0
	Coil turn number / slot	20
Rotor	Outer diameter (mm)	Φ48.7
	Inner diameter (mm)	Φ45.0
	Thickness (mm)	100.0
Pole number		8
Current value : I (Arms)		7.85
Load angle (deg)		90.0

数値解析で得られたトルク波形を図 3 に、数値解析結果を表 2 に示す。本結果から、提案法では従来法 A と同等のトルクレベルで、より低いトルクリップルが得られていることがわかる。また、従来法 B と同等のトルクリップルで、高いトルクレベルが得られていることがわかる。これは、前章で記述した電流フェーズに起因し、提案法では正相成分を損なうことなく逆相成分を相殺できているためである。すなわち、提案する電流制御法を用いることで、従来法では実現できなかったトルクレベル維持とトルクリップル抑制を両立できた。本報告では記述していないが、負荷量を変更した場合や、弱め電流制御を適用した場合など、様々な負荷条件でも提案法が優位であることが確認されており、同解析結果は文献(4)～文献(6)に記載されているため参照されたい。

次章では、本数値検証で得られた提案法の優位性を実機検証で確認する。検証するための試作機には図 2 及び表 1 のモータ仕様を選定した。

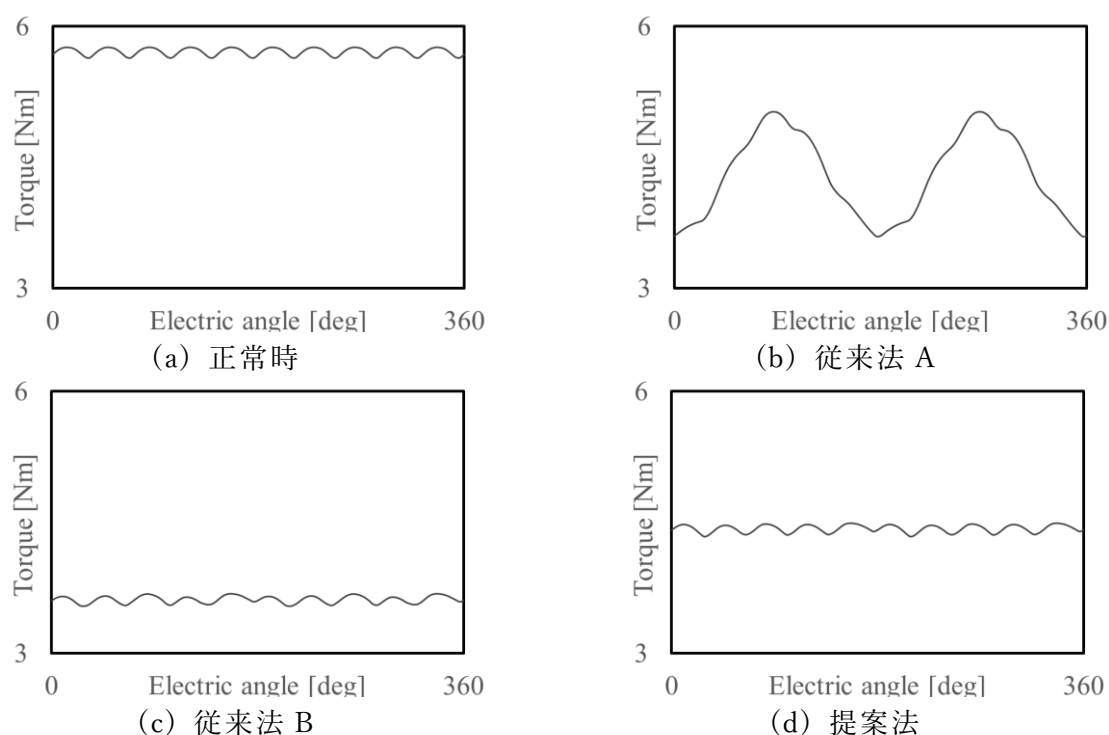


図 3 トルク波形の解析結果

表 2 数値解析結果

	Non-fault	Conventional A	Conventional B	Proposed
Average torque [N·m]	5.71	4.29	3.61	4.43
Torque level [%]	—	75.1	63.3	77.5
Torque ripple [mN·m]	120	1424	141	149
Ripple rate [%]	2.10	33.22	3.89	3.36

3. 実機検証

本章では、試作モータを用いた実機検証について記述する。モータベンチを図 4(a)に示す。本試験では、負荷モータを 200rpm で駆動させ、試験モータに通電する電流の振幅・位相を変更することで負荷を変化させる。トルク波形は、トルクメータで取得したアナログ値をオシロスコープにて取得する。また、キャリア成分の影響を除くため、4kHz のローパスフィルターを適用する。図 4(b)は 5 相分の H ブリッジモジュールを配置した 5 相インバータである。各相モジュールの DC ラインは、干渉・循環電流等の影響を取り除くため個別電源とする。試作モータを図 4(c), (d)に示す。

次に実機検証した条件における、各電流制御法の電流ベクトルを図 5 に、同条件時の電流波形を図 6 に示す。図 5 から、従来法 A 及び従来法 B で解析/実機間の電流位相のずれが見られるが、概ね狙い通りの条件で測定できており、本電流条件でトルク波形を比較することで提案法の優位性が確認できる。測定結果を表 5 に纏める。トルクレベルは従来法 A と提案法で高くなっており、リップル率は従来法 B と提案法で小さくなっている。本結果は解析結果と同様の傾向であり、解析/実験結果で整合性が確認できる。このことから、提案法を用いることで、実機検証においても従来法より高いレベルでの、トルクレベル維持及びトルクリップル抑制が実現できることが示された。

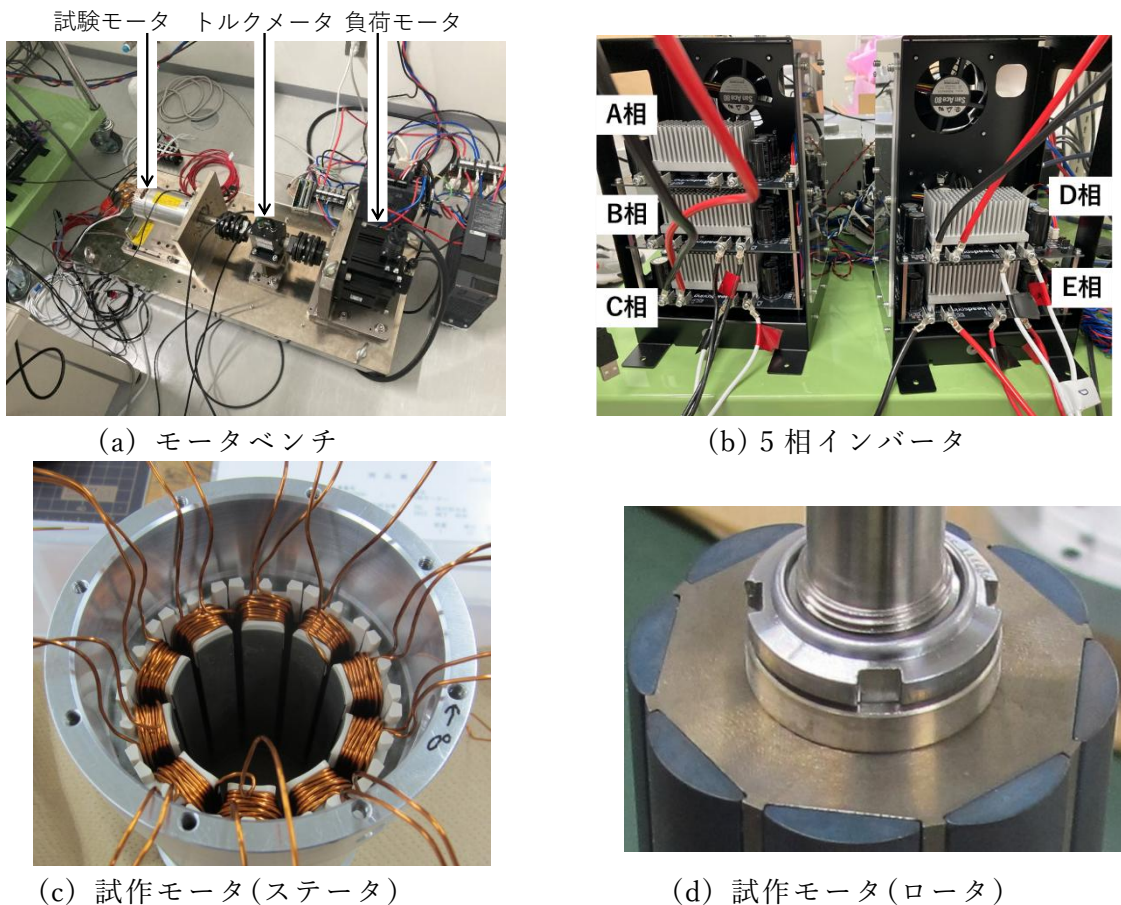


図 4 実験環境

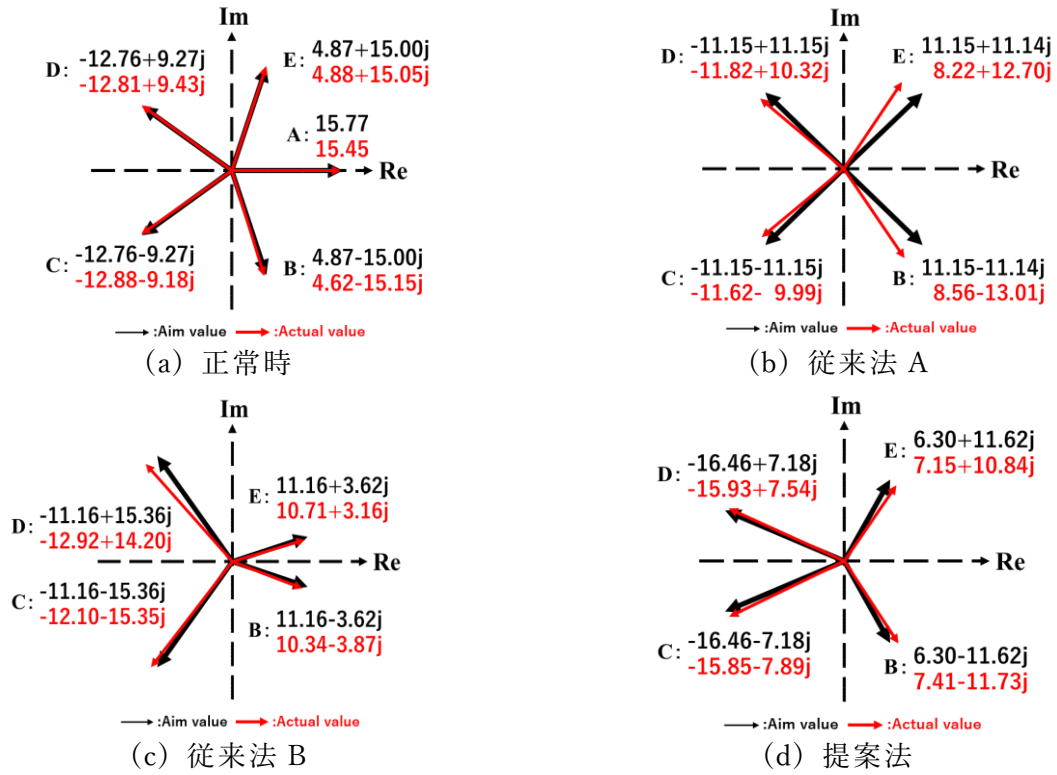


図 5 電流フェーザの狙い値と実測値の比較

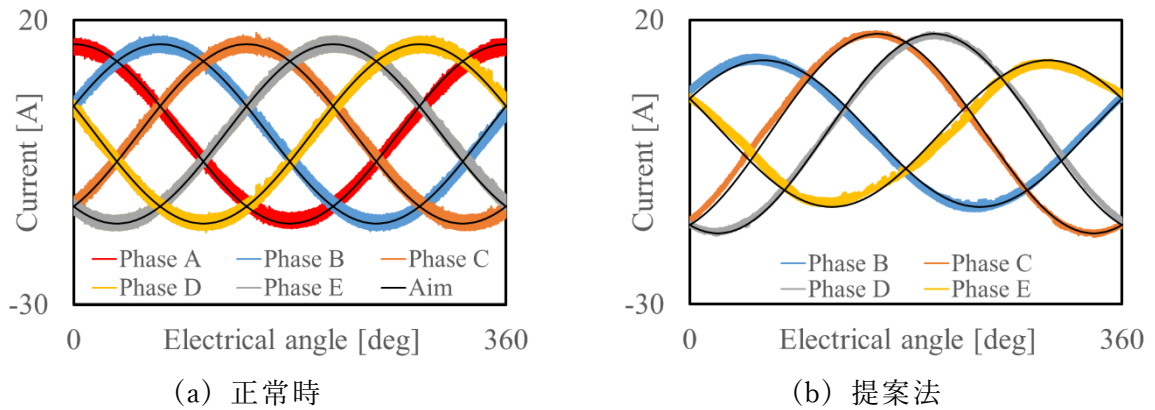


図 6 電流波形の狙い値と実測値の比較

表 3 実験結果

	Non-fault	Conventional A	Conventional B	Proposed
Average torque [N·m]	7.69	5.99	5.02	5.90
Torque level [%]	—	77.9	65.4	76.8
Torque ripple [mN·m]	242	2154	300	229
Ripple rate [%]	3.15	35.97	5.98	3.88

9. まとめ

本研究では、故障時のトルクレベル維持とリップル抑制を実現する、逆相電流重畳法についての検討を行った。まず様々な条件下での数値解析を行い、負荷量による影響、弱め電流による影響、相数による影響を明らかにした。また、基礎実機検証を行い、実機電流波形の影響を明らかにした。いずれの条件下においても、提案法の有効性が確認された。これらの結果から、提案法は狙いとするトルクレベル維持とリップル抑制の両立が可能であり、その効果は負荷条件・弱め電流の影響を鑑みても実現可能であることが分かった。また、実機検証結果から、キャリアリップル電流の影響を考慮しても、正弦波電流条件と同様の効果が得られることが分かった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) X. Deng, B. Mecrow, H. Wu and R. Martin, "Design and Development of Low Torque Ripple Variable-Speed Drive System With Six-Phase Switched Reluctance Motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 1, pp. 420-429, 2018.
- 2) Y. Wei, M. Qiao and P. Zhu, "Fault-Tolerant Operation of Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Independent Phase Driving Control," CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 6, no. 1, pp. 105-110 (2022).
- 3) Q. Jiang, Q. Lu, Y. Li and Y. Shen, "Fault-Tolerance Performance Analysis of a Five-Phase Permanent-Magnet Linear Synchronous Machine," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, pp. 1-4, 2021.
- 4) 高橋 颯汰,日高 勇気, "モータ巻線故障時のトルクリップルを抑制する逆相電流重畳法のフィードバック系に関する基礎検討," 電気学会 モータドライブ/回転機/自動車合同研究会, 2024.
- 5) S. Takahashi and Y. Hidaka, "Pulsation Reducing Effect in DC Current and Torque for Motor Fault-tolerance Based on Second Order Component Power Cancelation," Proc. of ICEMS 2024, 2024.
- 6) S. Takahashi and Y. Hidaka, "Torque Improvement Effect of Reverse-Phase Superimposition for Fault-Tolerance in Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Access, vol. 12, pp. 48807-48818, 2024.