

《様式B》

研究テーマ 「零相電流を利用した可変界磁モータのデュアルインバータ駆動システムに関する研究」

研究責任者 所属機関名 国立大学法人 静岡大学

官職又は役職 助教

氏 名 岩間 清大 メールアドレス iwama.kiyohiro@shizuoka.ac.jp

共同研究者 所属機関名 ヤマハ発動機株式会社

官職又は役職

氏 名 日吉 祐太郎

（令和5年度募集）第36回 助成研究 完了報告書

上記様式記載後

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要（1,000字程度）

本研究では、可変界磁永久磁石同期モータ（可変界磁 PMSM）を対象とし、零相電流を用いた界磁制御およびその駆動・制御手法について検討を行った。提案するモータは、永久磁石と界磁巻線を併用したハイブリッド構造を有しており、界磁巻線に電流を流すことで界磁磁束を電氣的に制御できる点に特徴がある。また、本研究ではモータハードウェアだけでなく、駆動回路についても検討しており、デュアルインバータを用いることで、従来必要とされていたブラシ機構や界磁電流を流すための DC/DC コンバータを用いることなく、界磁制御を実現している。具体的には、デュアルインバータはこれまでのモータ制御に使われていた回転磁界を生み出す三相平衡電流成分だけでなく、三相同位相成分（零相成分）の電流を制御することができ、この零相電流を界磁電流として用いることで、回転磁界の生成と界磁制御を1つのインバータで同時に実現できる。

さらに、従来界磁一定の PMSM に使われてきた dq 座標系に基づく最大トルク／電流比（MTPA）制御を拡張し、零相成分を含めた $0dq$ 三次元空間における拡張 MTPA 制御を検討した。特に、零相電流による磁束変化に加え、 d 軸電流、 q 軸電流のような他の電流を流した際におこるクロスサチュレーションの影響を考慮した磁束モデルを導入することで、従来モデルでは十分に再現できていなかったインダクタンス変化を表現し、より高精度なトルク推定および電流最適化が可能となることを示した。

試作機を用いた実験および電磁界解析により提案手法の有効性を検証した結果、従来の制御手法と比較してトルクの向上および動作点の最適化が可能であることを確認した。また、電流ノルムの低減によりインバータ損失の低減にも寄与する可能性が示された。さら

に、本研究成果については、日本の電気学会産業応用部門大会において発表を行うとともに、国際学術誌である IEEE Transactions on Industry Applications に論文が採択され、研究成果の妥当性および有効性について学術的にも検証を進めている。

本研究で対象としたハイブリッド形可変界磁モータおよびその駆動システムは、界磁磁束を制御可能であることから、低速高トルク運転と高速低トルク運転を両立できる広い運転領域を有する点に特長がある。この特性は、EV 用主機モータなどの用途において有用であり、走行状況に応じた運転が可能となる。また、界磁制御により必要な磁石量を低減できる可能性があり、資源制約やコスト低減の観点からも意義があると考えられる。

なお、本研究に関する特許出願は現時点では行っていない。

2. 実施内容および成果の説明（A 4 で、5 ページ以内）

2.1 研究背景および目的

近年、モータの高効率化・高出力密度化の要求を背景に、界磁磁束を制御可能な可変界磁 PMSM が注目されている。特に、永久磁石と界磁巻線を併用したハイブリッド形可変界磁 PMSM は、界磁磁束を連続的に制御可能であり、広い運転領域を実現できる点で有望である。

筆者らはこれまでに、零相電流を界磁制御の起磁力源として活用する手法を提案するとともに、直流成分の零相電流を制御可能なデュアルインバータ駆動システムについて検討を行ってきた。このシステムでは、モータ駆動と界磁制御を同一の電力変換器で実現できるため、新たな自由度を持つ電流制御が可能となる。

このような特徴を有するシステムの性能を最大限に引き出すためには、従来の d 軸・ q 軸電流に加えて零相成分を含めた最適な電流制御が重要となる。そこで本研究では、従来の MTPA 制御を拡張し、三次元電流空間（ $0dq$ 空間）において最大トルクを出力する拡張 MTPA 制御を適用することで、本システムの有効性を検証する。

2.2 提案モータおよび駆動システム

2.2.1 可変界磁原理

図 1 および表 1 に試作機の外観および主な諸元を示す。本試作機は、従来の PMSM と異なる大きな特徴を 3 点有する。1 つは、ステータフレームやシャフトに磁性体を用い、これらを磁路として活用している点である。2 つ目は、ステータコアおよびロータコアがそれぞれ軸方向に 2 分割されており、分割されたステータコア間に零相巻線が配置されている点である。3 つ目は、ロータの永久磁石配置を非対称とし、意図的に片側磁極を弱めている点である。

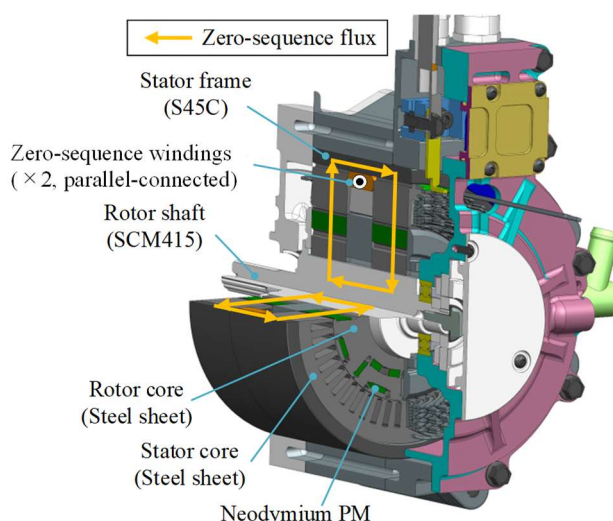


図 1 試作機の外観

表 1 試作機の諸元

Number of poles and slots		8 poles and 48 slots
Armature winding	Number of turns	4 turns/slot
	Resistance R_a	38.3 m Ω
Zero-sequence windings	Number of turns	250 turns
	Resistance R_z	8.75 Ω
Motor size	Stator frame diameter	ϕ 152 mm
	Stator core outer diameter	ϕ 140 mm
	Rotor core outer diameter	ϕ 93 mm

石配置を非対称とし、意図的に片側磁極を弱めている点である。

本モータでは、永久磁石によって形成される磁束に対し、零相電流の供給によって生じる磁束（零相磁束）を重畳することで、界磁磁束を調整する仕組みとなっている。具体的には、零

相電流を供給すると、その起磁力によりステータフレームおよびロータシャフトを通る磁束経路が形成される。この磁束はさらにロータコアを径方向に透過し、弱く設計された磁極側の磁束を補強する。この結果、モータ全体としての界磁磁束が増加する。

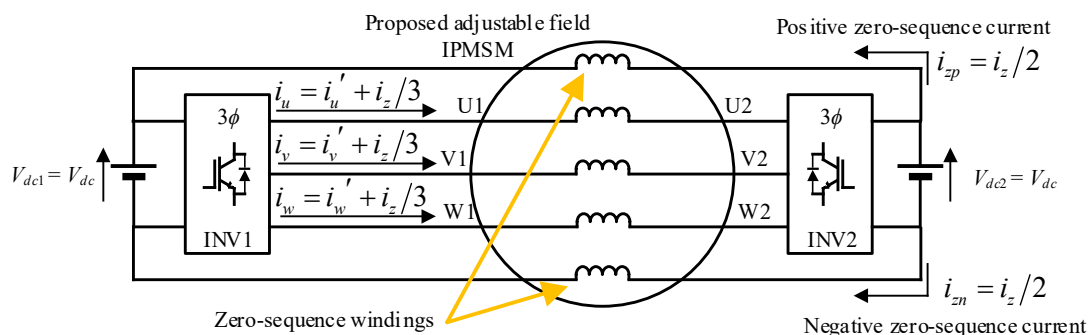


図2 デュアルインバータ駆動システム

2.2.2 デュアルインバータ駆動システム

図2に試作機の駆動回路として用いるデュアルインバータ駆動システムを示す。本システムは2つのインバータを用いる構成であり、片側のインバータが故障しても、もう片側のインバータで駆動を続けられるというフェールセーフの観点で近年注目されているシステムである。

この構成により、三相電流に加えて直流成分の零相電流を独立に供給することが可能となり、零相巻線を介して界磁磁束を電氣的に制御することができる。すなわち、本システムでは駆動回路と界磁制御を同一のインバータ系で実現できる点が特徴である。

一方で、本構成では電機子電流に三相成分と零相成分が重畳して流れるため、電流制御においてはこれらを統合的に扱う必要がある。そこで本研究では、従来のd軸・q軸電流に加えて零相成分を含めた三次元空間（0dq空間）に基づく制御手法を適用し、その有効性を検証する。

2.3 デュアルインバータ駆動可変界磁モータの最大トルクを出力する制御（拡張MTPA制御）

本研究では、モータから所望のトルクを効率よく出力するための制御手法として、最大トルク／電流比（Maximum Torque per Ampere: MTPA）制御に着目する。MTPA制御とは、所定の電流で最大のトルクを得るために電流の大きさおよび位相を最適化する手法であり、モータの高効率駆動において広く用いられている。

一方、本研究で対象とする可変界磁モータシステムでは、従来用いられてこなかった零相電流を積極的に界磁制御に利用するため、d軸・q軸電流に加えて零相成分を含めた制御が必要となる。そこで本研究では、従来のMTPA制御を0dq座標の三次元空間へ拡張した拡張MTPA制御を適用する。

以下では、従来のMTPA制御と拡張MTPA制御の違いについて図3に示す電流ベクトルの違いを用いて説明する。

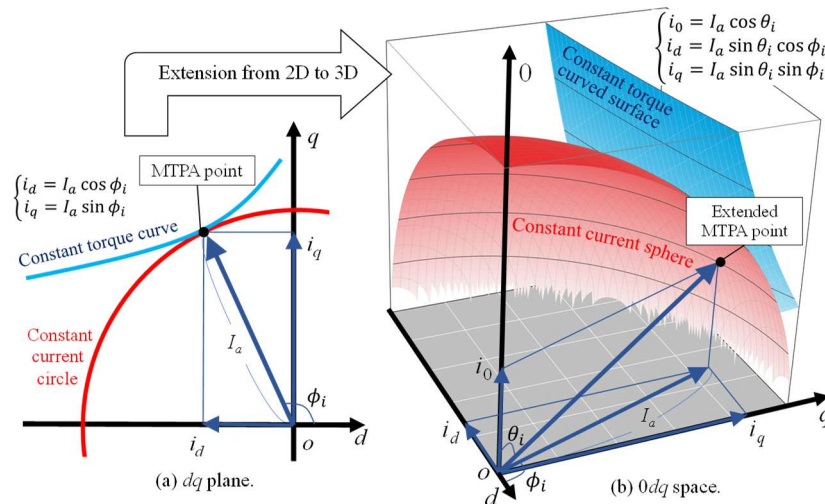


図3 従来 MTPA 制御と拡張 MTPA 制御の座標系の違い

2.3.1 従来 MTPA 制御

試作機のような永久磁石をロータコア内部に埋め込んでいる埋込磁石形永久磁石同期モータ (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM) は、 q 軸電流を供給することで永久磁石に起因するトルク (マグネットトルク) を発生させることができ、さらに d 軸電流を適切に与えることで磁気抵抗を利用するリラクタンストルクを出力できる。したがって、これら 2 種類のトルクのバランスを最適化することで、より少ない電流で大きなトルクを得ることができる。

MPTA 制御は、このような考えに基づき、所定の電流で最大のトルクを出力する電流条件を求める手法である。具体的には、図 3(a)に示すように、電流の大きさを一定にしたときの電流ベクトルの軌跡は dq 平面上で円として表される。一方で、ある一定のトルクを出力するための電流条件は曲線としてあらわされる。MTPA 制御における動作点は、これらの円と曲線が接する点として求められる。

2.3.2 拡張 MTPA 制御

一方、本研究で対象とするデュアルインバータ駆動可変界磁 PMSM では、 d 軸・ q 軸電流に加えて零相電流を利用できるため、電流の自由度が拡張される。このため、電流ベクトルは従来の dq 平面ではなく、零相成分を含めた三次元空間 ($0dq$ 空間) で扱う必要がある。すなわち、 dq 平面上で円として表されていた電流ベクトルの軌跡は、三次元空間では球として表される (図 3(b)の赤色の曲面)。

また、所定のトルクを出力するための電流条件は、三次元空間上の曲面として表される (図 3(b)の青色の曲面)。拡張 MTPA 制御では、この電流球とトルク曲面が接する点を求めることで、最適な電流条件を導出する。

さらに、可変界磁 PMSM では界磁磁束が零相電流に依存するため、トルクは d 軸電流、q 軸電流に加えて零相電流の影響を受ける。このため、トルクを正確に評価するには、これらの 3 つの電流の影響を考慮した磁束のモデル化が必要となる。

本研究では、このような関係を考慮することでトルク曲面をより適切に表現し、電流球との接点を拡張 MTPA 制御の動作点として利用する。その結果、従来の MTPA 制御と比較して、より少ない電流で高いトルクを出力することが可能となる。

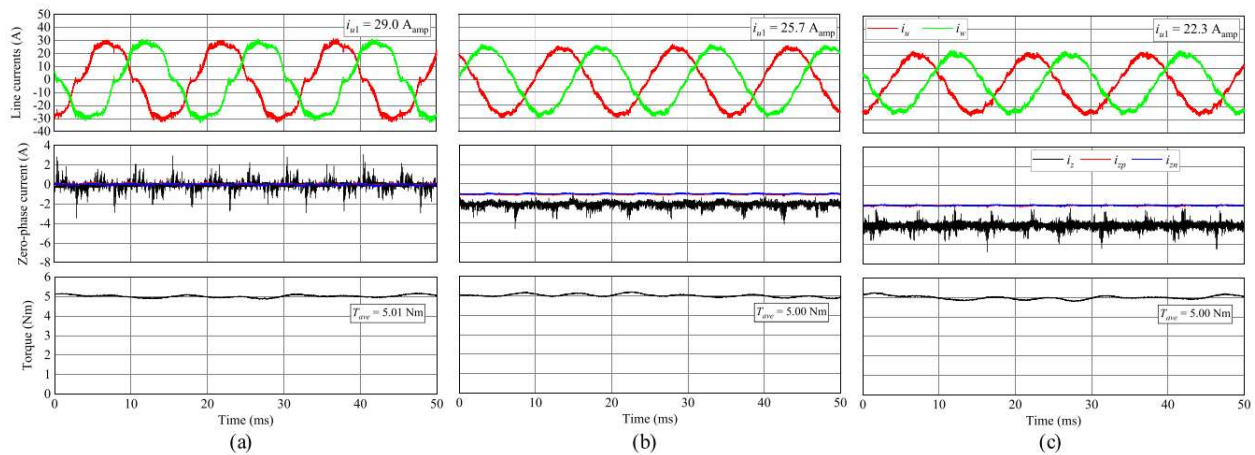


図 4 零相電流制御の実験結果 (a) 零相電流なし, (b) -2A の零相電流, (c) -4A の零相電流

2.4 電磁界解析および実機試験結果

図 4 に提案するデュアルインバータシステムにより試作機を駆動した際の電流波形およびトルク波形を示す。波形は上から、U 相・W 相電流、零相電流、トルクである。図 4(a)は零相電流を流さない場合、図 4(b), (c)はそれぞれ零相電流を-2 A、-4 A とした場合の結果である。どの条件においてもトルクは約 5 Nm を維持していることが確認できる。一方で、電流振幅は図 4(a)で 29.0 A、図 4(b)で 25.7 A、図 4(c)で 22.3 A と、零相電流の増加に伴い低減している。

以上より、提案するデュアルインバータシステムでは三相電流に直流零相電流を重畳して制御することが可能であり、界磁磁束を強めることで、同一トルク条件において電流を低減できることが確認された。

2.4.2 MTPA 曲線

図 5 に拡張 MTPA 制御における電流動作点（拡張 MTPA 曲線）の計算値と解析結果を示す。

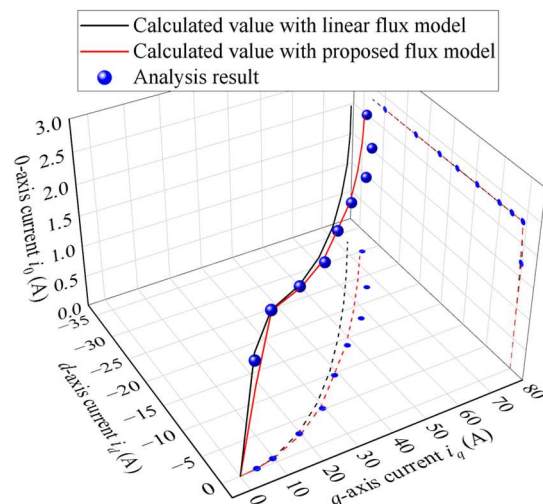


図 5 拡張 MTPA 曲線の計算値と解析値

本試作機では、零相電流による界磁制御の効果が大きいため、まず零相電流成分 i_0 が優先的に増加していることが分かる。また、 i_0 が限界値付近に到達した後は、負の d 軸電流を利用してリラクタンストルクを発生させており、電流の自由度を活かした最適な動作が実現されている。さらに、計算結果と解析結果は良く一致しており、本手法により適切な電流動作点が導出できていることが確認された。

2.4.3 電流とトルクの関係

図 6 に、提案する磁束モデルに基づく計算結果と、3 種類の制御による実験結果を示す。実験では、(1)拡張 MTPA 制御、(2)界磁制御なし+リラクタンストルクなし ($i_d = 0$ A かつ $i_z = 0$ A)、(3)界磁制御なし+リラクタンストルクあり ($i_d = 0$ A かつ $i_z = 4$ A) の 3 条件を比較した。図より、提案手法による計算結果と拡張 MTPA 制御の実験結果は

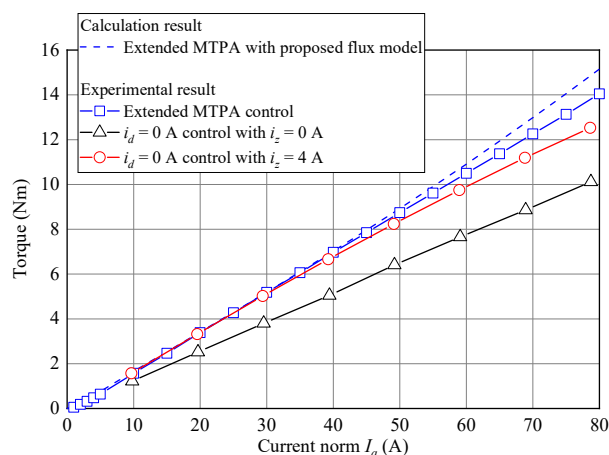


図 6 電流の大きさとトルクの実測結果

良く一致しており、適切な電流動作点が導出できていることが確認できる。また、従来の $i_d = 0$ A 制御と比較して、拡張 MTPA 制御ではトルクが向上しており、最大トルクは約 12.1 %改善している。この結果から、提案手法によりモータ性能が向上することが示された。

2.5 まとめ

以上より、本助成において、零相電流を利用した可変界磁モータのデュアルインバータ駆動システムおよびその制御手法について検討を行い、提案手法の有効性を実験および解析の両面から確認した。

また、本研究成果はこれまでに国内会議および国際会議において発表するとともに、IEEE 論文誌への投稿も行っており、学術的な観点からも一定の評価が得られている。

本研究で提案したシステムは、界磁制御とモータ駆動を統合した新たな駆動方式であり、今後は電動車両用モータをはじめとする各種電動化機器への応用が期待される。