

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

| | |
|---------|-------|
| 所属機関 | 神奈川大学 |
| 職位または役職 | 助教 |
| 氏名 | 中沢 吉博 |

1. 研究題目

三相電流臨界モードによるスイッチトリラクタン্সモータの高効率・力率制御

2. 研究目的

2023年に実用化が期待されている電動垂直離着陸機 eVTOL などのバッテリーを電源とするアプリケーションでは、航続距離を伸ばすためにモータの高効率化が非常に重要となる。また、高出力を得るためにモータサイズを大きくすると重量が増して航続距離に影響が出てしまうため、同一モータサイズでより大きい出力を引き出す必要がある。そのため、モータ容量ぎりぎりまで利用することが求められるため、モータの高力率化も重要となる。

また、eVTOL などの移動体アプリケーションは、モータの様々な動作点(トルク, 回転速度)で駆動されるため、すべての動作点での高効率・力率制御が求められる。特に eVTOL などの航空機は地面に拘束された 2 自由度の自動車とは異なり自由度が 6 つある。上昇/下降, 左/右, 前進/後退, ロール, ピッチ, ヨー制御のために、プロペラを駆動するモータの動作点は操縦者の指令により常に変化している。さらに、乗員の移動や荷崩れによるウエイトバランスの変化, 突風などの外乱によっても動作点は変化する。したがって、トルクや回転速度が急変した際にも高効率・力率制御を安定的に維持することが求められる。そこで、本研究の目的は動作点が急変した際にも三相電流臨界モードを維持することにより、常に安定的に高効率・力率を達成する eVTOL 用スイッチトリラクタン্সモータ(SRM)ドライブを開発することである。

報告者が提案している新しい励磁モードである三相電流臨界モード(TP-CRM)がモータ効率や力率, 出力に与える影響について従来の 120° 通電方式と比較検討を行ってきた。現状の TP-CRM アルゴリズムでは、転流角 θ_c の調整は消磁角 θ_q と次相のターンオン角 θ_0 を比較しながら行っているため、ターンオン角や負荷が急変した場合は転流角 θ_c の調整に時間がかかるため、TP-CRM モードに移行するまで時間を要する問題がある。そこで本研究では、駆動条件から消磁角 θ_q と次相のターンオン角 θ_0 が一致するときの転流角 θ_c (最適転流角 θ_c^{opt} と呼ぶことにする) の予測法を提案する。

3. 研究内容及び成果

図 1 に 2 種類の最適転流角予測法を示す。TP-CRM では前述したように、消磁角 θ_q が次相のターンオン角 θ_0 と等しくなるときの転流角 θ_c を最適転流角 θ_c^{opt} と定義する。転流角 θ_c から消磁角 θ_q の期間(転流期間)は、インバータの IGBT などのスイッチング素子が OFF の状態であり、コイルに蓄えられた磁気エネルギーがインバータのダイオードを介して電源に回生されているため、電源電圧を変化させない限り制御不可能である。さらに、転流期間は動作点によって変化するため、ターンオン開始後から転流開始までの期間に、最適転流角 θ_c^{opt} を予測する必要がある。

最適転流角予測法は鎖交磁束の傾きが電流(負荷)によって変化することを利用したフラックススロープ法(図 1(a))と、自己インダクタンスが変化することを利用したインダクタンススロープ法(図 1(b))の 2 種類を提案し検証する。

図 1(a)においてターンオン角 θ_0 をある値に固定し、電流(負荷)を増加させていくと、鎖交磁束の傾きは増加し、最適転流角 θ_c^{opt} は増加する。したがって、各負荷トルクについて鎖交磁束の傾きと、そのときの最適転流角 θ_c^{opt} をテーブル化しておけば、ターンオン角 θ_0 と鎖交磁束の傾きから最適転流角 θ_c^{opt} を予測することができる。インダクタンススロープ法では、図 1(b)のように電流(負荷)増加とともにインダクタンスの傾きは減少するためこれを利用する。

図 2 は負荷トルク 0.1Nm における通電角指令値を変化させたときのターンオン角 θ_0 、転流角 θ_c 、消磁角 θ_q である。図(a)の最適転流角制御をしない場合は、転流角が目標値に達するまで 0.8s ほど時間を要している。図(b)は最適転流角制御を行った場合であり、転流角は目標値に瞬時に達しているのがわかる。これより、指令値や負荷が急変した際にも三相電流臨界モードを維持することが可能である。

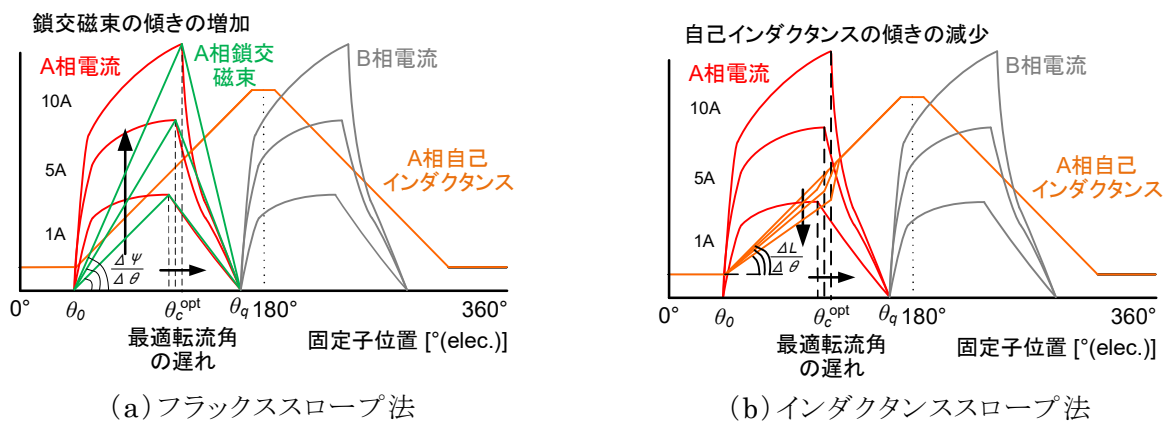


図 1 最適転流角予測法

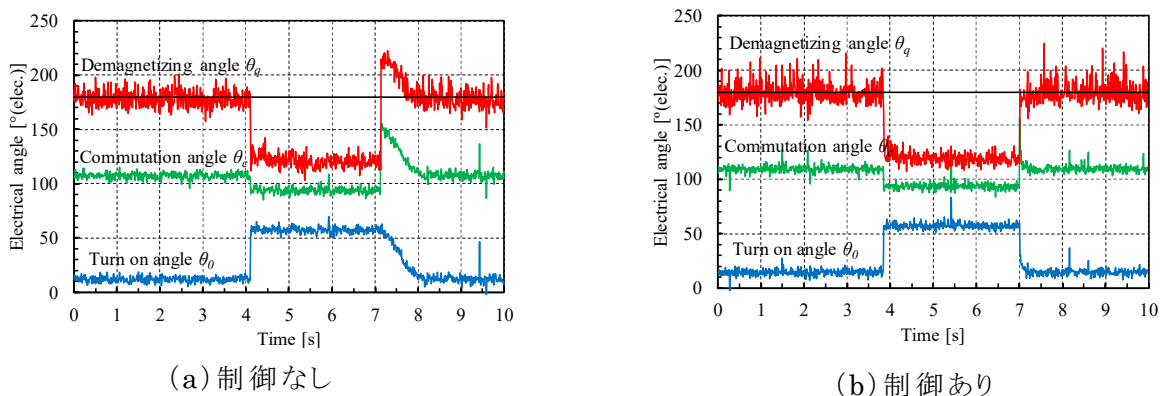


図 2 最適転流角制御結果

4. 今後の研究の見通し

三相電流臨界モードでは三相の電流波形が重ならないためにトルク脈動が大きくなる。慣性モーメントが非常に大きなフライホイールなどの用途では大きな問題にはならないが、一般的な用途ではトルク脈動は小さい方がよい。したがって、トルク脈動を平滑化させるために、4相モータなどの多相モータや位相をずらした多段型モータなどと組み合わせる工夫が必要である。しかし、多相モータや多段型モータは特殊モータであり一般的ではないため、三相モータにおける対策について検討する必要がある。

電流波形の立ち上がり立ち下がりがほぼ直角であれば、電流波形の重なりがなくてもトルクの落ち込む区間がなくなるため、トルク脈動を大幅に減少させることができる。そのためには、電源電圧を高電圧化させる必要がある。SRMのトルクは電流だけではなくインダクタンスの大きさにも依存していることから、トルク脈動を平滑化させるためには電流制御も併用する必要がある。今後は三相電流臨界モード時におけるトルク脈動の平滑化のための電流制御法について検討を行っていく。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

Y. Nakazawa, T. Kimura, H. Funaki: "Improved Transient Response of Switched Reluctance Motor with Interphase Critical Current Mode", The International Council on Electrical Engineering (The ICEE Conference 2024) (発表予定)