

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	秋田工業高等専門学校
職 位 または 役 職	講 師
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スモータの高効率・力率制御

2. 研究目的

2018 年に経済産業省が電動垂直離着陸機(eVTOL), 所謂“空飛ぶクルマ”を定義し, 2023 年には実用化するロードマップを発表した。これにより eVTOL の実用化・量産化に向けた取組が日本でも本格化し始めた。現在の eVTOL には高効率・軽量の永久磁石型同期モータ(PMSM)が採用されている。永久磁石の熱減磁を防ぐためにジスプロシウムが使われるが, 埋蔵量が少なく産出国との政治的な要因により価格が金よりも高い時期があり, 今後 eVTOL の量産化段階で問題になると予想される。また eVTOL 用モータケースは空冷用の穴があり, 離着陸時に地面の砂鉄が舞い上がり, ネオジム磁石に砂鉄が蓄積してギャップが詰まる。ドローンにおいてはこれが原因で墜落する事故がすでに起きている。そのため, 定期的にモータを分解掃除の必要があり, eVTOL の安全面や維持コスト面で大きな問題になると予想される。

そこで, スwitchトリラクタンスモータ(SRM)が eVTOL 用モータとして適していると考えられる。永久磁石がないためブロワで簡単に砂鉄を除去できる。また SRM は鉄と銅だけで構成されているため, 低コストかつリサイクルも容易であり, SDGs 目標 9 である「包摂的で持続可能な産業化を推進」の達成に貢献できる。

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ことにより, モータの高力率化も重要となる。そこで, 本研究の目的は報告者が提案する三相電流臨界モードにより SRM の効率および力率を高める制御方式を実現し, 高効率・力率な eVTOL 用 SRM ドライブを開発することである。

3. 研究内容及び成果

図 1 は電流不連続モード(DCM)と三相電流臨界モード(TP-CRM)の各波形を示したものである。図 1(a)において、DCM は非対向位置 0° から 120° に励磁されるモードであり、一般的な 120° 通電である。A 相電流に着目すれば、電流は電気角 360° までには $0A$ となっており不連続的に流れる。TP-CRM については図 1(b)を用いて説明する。ターンオン角は DCM と同様に 0° で固定される。転流角は”消磁角=次相のターンオン角”となるように、動作点に応じて調整される。A 相, B 相で見れば”A 相消磁角=B 相ターンオン角”となるように A 相転流角が調整される。TP-CRM のアルゴリズムは消磁角検出器と転流角調整器から構成される。消磁角検出器では転流を開始してからゼロ電流を検出し、そのときの回転子位置を消磁角としている。また、転流角調整器では、消磁角検出器により検出した消磁角と次相のターンオン角を比較器により比較し、消磁角が次相ターンオン角よりも小さいときは転流角を 1° 増加させ、消磁角が次相ターンオン角よりも大きい場合は 1° 減少させる。したがって、励磁周期ごとに 1° ずつ微調整を行っている。

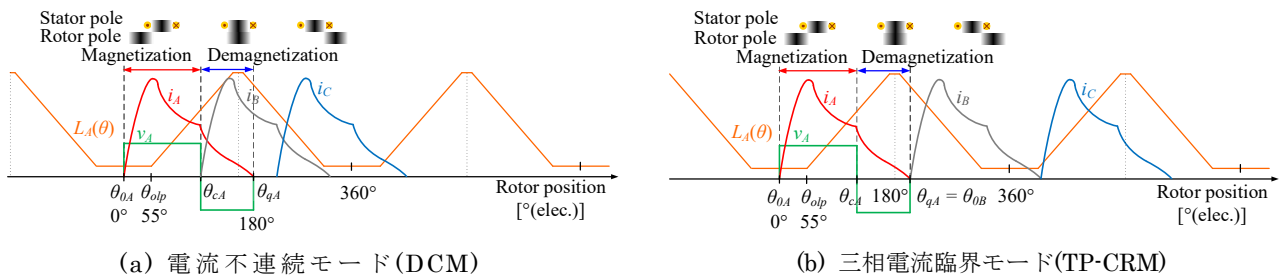


図1 電流モード

図 2 にターンオン角 40° における DCM および TP-CRM の相電流と自己インダクタンス波形を示す。動作点は回転数 1000rpm , 負荷トルク 0.8Nm である。負荷トルクはサーボモータにより制御し、回転数は供試 SRM の速度ループ付 PWM 制御器により制御される。図 2(b)より A 相消磁角と B 相ターンオン角が一致しており、安定して TP-CRM による運転ができている。

図 3 は上記動作点においてターンオン角を変化させた場合の DCM および TP-CRM の効率および力率である。非対向位置 0° から効率および力率に差が出始めており、ともに TP-CRM の方が高い値となった。図 2(a)から DCM では転流期間と次相の励磁期間が重なるため、前相コイルの電流が次相のコイルに流れることにより、特徴的な電流波形となっている。一方、図 2(b)の TP-CRM では速やかに転流が終了しており、より無効電力が小さいことがわかる。DCM では逆トルク領域に電流が入っているが、TP-CRM では正トルク領域にしか電流が流れていないためより高い効率を得られた。

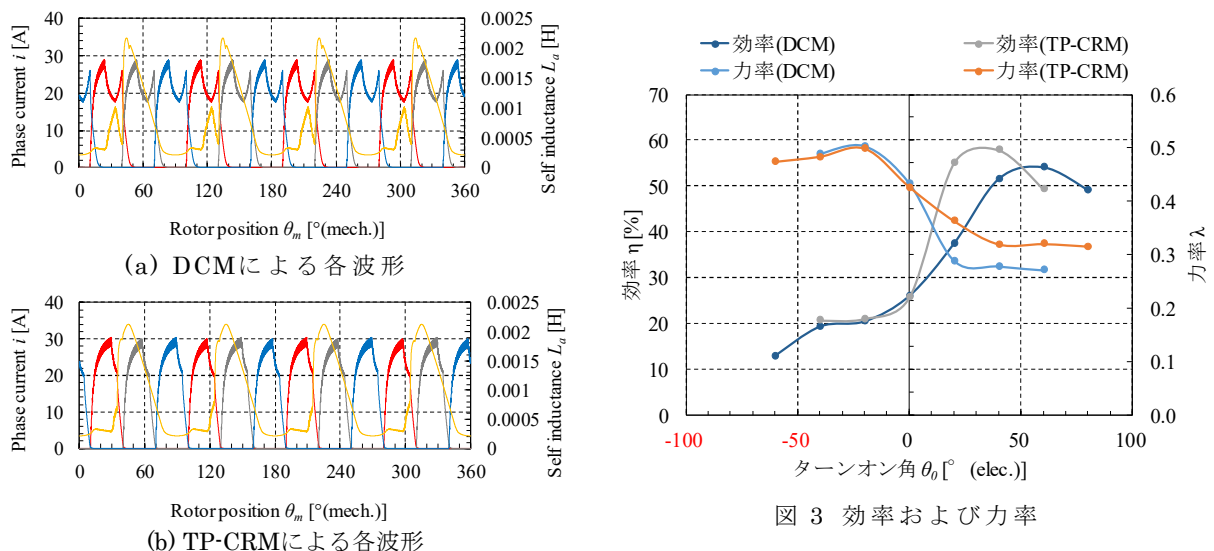


図 2 相電流と自己インダクタンス

図 3 効率および力率

4. 今後の研究の見通し

現状では転流角の調整は消磁角と次相のターンオン角を比較しながら行っているため、負荷が急変した場合は移行先の動作点で TP-CRM となるための時間を要する。したがって、今後はステップ状の負荷に対しても TP-CRM を維持するためにアルゴリズムを改良する必要がある。転流角から消磁角の期間(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のみ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大きく変化するため、ターンオン開始後から転流開始までの励磁期間に、消磁角と次相のターンオン角が一致するような転流角を予測する必要がある。

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: “Characteristics of Switched Reluctance Motor with Interphase Critical Current Mode”, 11th International Conference on Power Electronics (ICPE)-ECCE Asia, 2023(発表予定)