

修士学位論文要約（令和4年3月）

小型EV用アキシシャルギャップ型スイッチトリラクタンスモータの損失分析と実用的駆動法に関する研究

佐藤 航汰

指導教員：中村 健二

A Study of Loss Analysis of Axial-Flux-type SR Motor for Compact EV and Its Practical Driving Method

Kota SATO

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In a previous study, an in-wheel AFSRM for a compact EV was designed and prototyped. The usefulness of the prototype AFSRM was proved; while it was pointed out that the measured efficiency was smaller than the calculated one. In this study, we investigate the causes of error by using SR motor's equivalent circuit. On the other hand, the prototype AFSRM drove with high performance rotation position sensor, which is expensive and does not have robust structure for in-wheel motor. Therefore, we developed the new driving method for AFSRM, which use a simple sensor. It was proven that the denoise system in the new method needs to be improved but can become useful method for torque control of AFSRM.

1. はじめに

先行研究では、図1に示すダブルステータ構造のアキシシャルギャップ型スイッチトリラクタンスモータ (AFSRM) の試作評価と、小型EV用インホイールモータへの適用に関する検討が行われてきた。その結果、試作AFSRMは小型EVに適用するための目標トルクを達成し、また実車体に搭載した走行も実現した¹⁾。しかしながら一方で、試作AFSRMの効率²⁾は3次元有限要素法(3D-FEM)による設計値を下回ったことから、この原因の解明と改良が不可欠である²⁾。また、試作AFSRMは高価な回転子位置センサを用いて制御されるが、製作コストやモータ積載容量の観点から、低コストで小型な簡易位置センサを用いた制御手法の開発が求められる。

そこで本研究では、AFSRMのさらなる性能向上のための損失分析と簡易なセンサを用いた実用的な駆動制御法について検討を行った。

2. AFSRMの損失分析に関する検討

図2に、鉄損を考慮したAFSRMの等価回路とモータ駆動時の電圧電流波形を示す。この等価回路において r は等価鉄損抵抗であり、この抵抗における損失がAFSRMで生じる鉄損に相当する。この図からわかるように、等価鉄損抵抗はモータ巻線にパルス電圧を印加した際の電流応答波形と巻線インダクタンスから計算できる。ただし、等価鉄損抵抗はモータの回転子位置角と印加電圧の周波数に依存するため、AFSRMの動作周波数(58~320 Hz)に対して、電気角1周期を10分割し、各回転子位置角ごとに測定を行った。

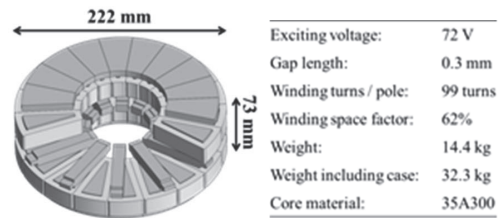


図1 試作AFSRMの基本構成

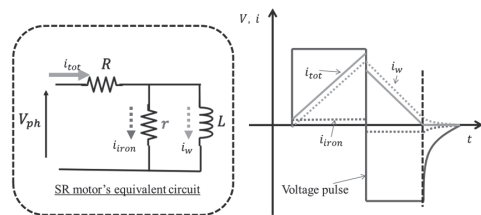


図2 SRモータ等価回路と計算した駆動時の電圧電流波形

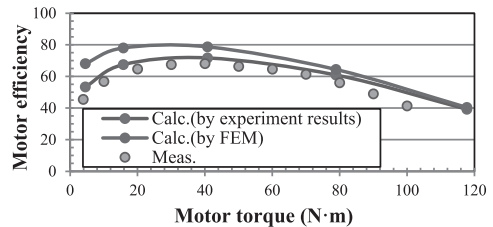


図3 試作機の効率特性

図3に、等価鉄損抵抗に基づく鉄損を考慮した場合の効率を示す。この図を見ると、実測値との誤差が小さくなり、精度が改善されたことが了解される。すなわち、現状の3D-FEMでは未考慮の鉄損が実機で生じていることが明らかとなった。今後は、この損失の発生箇所特定と改善に取り組む必要がある。

3. AFSRMの実用的駆動法に関する検討

本研究では、図4に示す簡易センサを用いた制御システムの開発についても検討を行った。このセンサは通常のセンサよりも小型で廉価である一方、5 deg.毎の回転子位置しか検出できない。よって、5 deg.毎の回転子位置から現在の回転子位置を計算したうえで、モータ制御を行うプログラムを作成し、その実用性を実験により検証した。

図5、図6に実験の結果を示す。図5は、励磁終了角推定制御と呼ばれる制御を行った結果であり、U相電流が15 deg.で0Aとなるような制御を行っている。図6は、瞬時相トルク分配制御と呼ばれる制御を行った結果であり、3相の合計トルクが赤の点線で示す指令値に追従するような制御が行われている。

図5を見ると、U相電流は約25 deg.で0Aとなっており、制御に誤差が生じていることが確認される。また図6を見ると、各相トルクが指令値に追従しようとしているが、合計のトルクは指令トルクに満たず、トルクリプルも大きくなっていることが確認される。以上の結果より、簡易センサ

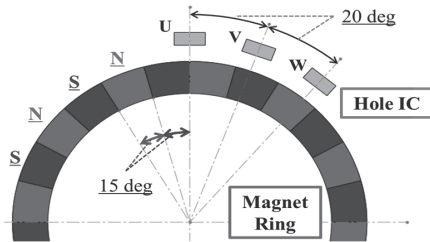


図4 磁気リングとホール IC からなる簡易センサ

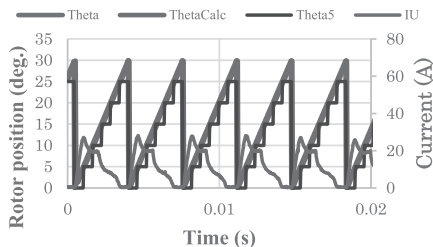


図5 励磁終了角推定制御の実験結果

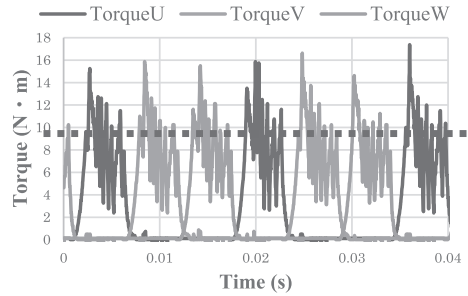


図6 瞬時相トルク分配制御の実験結果

から回転子位置を推定したうえで制御を行うと、制御性が悪化してしまうことがわかった。これは、簡易センサ信号に対するノイズ処理での時間遅れが影響していると考えられる。簡易センサに混入するノイズは制御不良を引き起こし、最悪の場合、制御素子や駆動回路の破損を招く。したがって、今回のプログラムでは信号の時間遅れをある程度許容する代わりに、ノイズの除去を行うような処理を組み込んでいる。この信号遅れが結果的に制御の時間遅れにつながり、図5、図6のような実験結果になったと考えられる。

4. まとめ

以上、本研究では小型EV用試作AFSRMの効率低下要因の分析と、低コスト化を図った新制御手法の開発および実用性検証を行った。

効率低下要因の分析では、AFSRMの等価回路に基づいて、AFSRMで生じている鉄損およびモータ駆動効率を算定した。その結果、実測値と計算値がよく一致し、先行研究において不明とされていた効率の乖離要因は鉄損に分類される損失であったことを解明することができた。

次いで、低コスト化を狙った制御手法の開発では、従来の高精度センサを精度の落ちる簡易センサに入れかえたうえでの制御手法を考案することで、低コストで小型な制御系の実現を目指した。作成したプログラムを用いて実機試験を行った結果、簡易センサ信号に対して行ったノイズ処理に伴う信号遅れによって、制御性が悪化してしまったことが確認された。現状の制御性ではEV駆動には不十分であるため、ソフト面およびハード面から、信号遅れが少なくノイズ耐性の強いシステムに改善していく必要がある。

文献

- 1) K. Takase, H. Goto, and O. Ichinokura, *The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery*, RM-15-146 (2015) (in Japanese).
- 2) H. Aizawa and K. Nakamura, *J. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, 4, 62 (2020) (in Japanese).