アキシャルギャップ型 SR モータの解析精度改善と性能向上に関する検討

Improvement of Calculation Accuracy and Performance Improvement of Axial-Flux-type SR Motor

相澤 拓毅 サ・中村 健二

東北大学 大学院工学研究科,仙台市青葉荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

H. Aizawa[†], K. Nakamura

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

An axial-flux-type switched reluctance motor (AFSRM) has flat shape, mechanical robustness, and heat-resistant, which are suitable for in-wheel direct-drive-type electric vehicle (EV). In a previous paper, 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 torque was smaller than the calculated one. This paper investigates the causes of error and presents countermeasures for performance improvement by using three-dimensional finite element method (3D-FEM).

Key words: Axial-flux-type switched reluctance motor (AFSRM), In-wheel motor, Electric vehicle (EV)

1. はじめに

近年,大気汚染などの環境問題や化石燃料の枯渇問題に 対応するため,国内外で電気自動車(EV)の研究・開発 が盛んに行われている.EV は化石燃料を使用せず,電気 エネルギーによって駆動するため,温室効果ガスを一切排 出せず,特定の資源に依存しないといった利点を有する. 一方で,2次電池のエネルギー密度が低いために,1充電 当たりの走行距離が短く,また充電に時間がかかることか ら,今後より一層のEVの普及には解決すべき課題も多い.

上述の問題に対して,筆者らは EV のインホイールダイ レクト駆動に着目している.インホイールダイレクト駆動 は,EV の各駆動輪のホイール内部にモータを格納し,減 速機を介さずにタイヤを駆動する方式であり,2次電池の 搭載スペースの拡大や,動力伝達に伴う機械損の低減,各 駆動輪の独立制御による走行性能の向上が期待される.一 方で,インホイールモータは搭載スペースが限られる他, 振動や高温環境下での駆動にも耐えうる堅牢性と信頼性 が求められる.

筆者らは、インホイールダイレクト駆動に適するモータ の一つとして、スイッチトリラクタンス(SR)モータに 着目している.SRモータは、鉄心と巻線のみで構成され るため、堅牢で安価である¹⁾.また、永久磁石が不要であ ることから、惰行時に磁石磁束由来の損失や逆起電力が発 生しないため、電費や回路の安全性・信頼性も高い.しか しながら、希土類磁石モータと比較して、一般にSRモー タはトルク密度が低いという課題がある.

これに対して,先に筆者らは,軸方向に空隙を有するア キシャルギャップ(Axial-Flux:AF)構造に着目した²⁾. ホイール内部のような偏平な空間にモータを収める場合, ー般的な径方向に空隙を有するラジアルギャップ (Radial-Flux: RF)構造よりも、AF構造の方がトルク 発生面を大きくできるため、トルク密度が向上する. さら に、AF構造は回転子と固定子を軸方向に複数並べること ができるため、複数ステータ、複数ロータを組み合わせた マルチギャップ構造を比較的容易に実現可能であり、シン グルギャップ構造よりもトルク密度を向上させることが できる.

これまで、ダブルステータ型のアキシャルギャップ SR 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ついて検討が進められてきた^{3),4)}. そ の結果、Fig. 1 に示すように、後輪 2 つのホイール内に AFSRM を搭載した小型 EV が試作され、良好な走行性能 を有することが明らかになった.しかしながら一方で、試 作 AFSRM のトルクは 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 必要不可欠である.

本稿では、3D-FEM を用いてトルク低下の原因につい て解明を行うとともに、それに基づくトルク向上策につい て検討を行ったので報告する.



Fig. 1 Compact EV with in-wheel AFSRMs.

2. AFSRM の試作機の概要

Fig. 2に先行研究で試作された 3 相 AFSRM の構成を, Table1 に諸元をそれぞれ示す⁴⁾. 固定子極と回転子極は それぞれ 18 極, 12 極である.本 AFSRM は, 1 つの回転 子を 2 つの固定子で挟み込んだ,いわゆるダブルステー タ構造を有し,対向する固定子極には同一方向に巻線を巻 き,それらを直列に接続することで,回転子極を貫く方向 に磁束を発生させている.これにより,回転子ヨークが不 要になる.鉄心材料は無方向性ケイ素鋼板(35A300)で ある.固定子はトロイダル状の鉄心を切削して製作され, 回転子はケイ素鋼板の単板を周方向に積層する形で製作 されている.

Fig. 3 に, 試作機のハウジングや支持構造も含めた全体 構成を示す. 固定子鉄心は, バックヨークと巻線との間に 支持板を挟み込むことでハウジングに固定している. ハウ ジングには超々ジュラルミン, 固定子支持板にはステンレ



Fig. 2 Structure of a prototype AFSRM.

Fable 1	Specifications	of a prototype	e AFSRM.
---------	----------------	----------------	----------

Exciting voltage:	72 V	
Gap length:	0.3 mm	
Winding turns / pole:	99 turns	
Winding space factor:	62%	
Weight:	14.4 kg	
Weight including case:	32.3 kg	
Core material:	35A300	



Fig. 3 Configuration of the prototype AFSRM including holders and housing.

スを使用している.回転子極は内外 2 つのリングで支持 し,軸に固定されている.両リングにはステンレスを使用 している.また,軸受には円錐ころ軸受を使用しており, 回転子位置検出器としてレゾルバを組み込んでいる.

3. AFSRMのトルク低下要因の分析

3.1 鉄心の積層構造の影響

第一のトルク低下要因として,鉄心の積層構造の影響に 着目した. 試作 AFSRM の固定子,回転子はともに積層 鋼板が用いられており, Fig. 4 および Fig. 5 に示すよう に,それぞれ径方向,周方向に積層されている.しかし, 先行研究ではこれらが考慮されていなかったことから,今 回,鉄心の積層を考慮した解析を行い,その影響を分析し た.なお,3D-FEM で積層を考慮する際には,モデル自 体はバルクのままで,積層の方向と鉄心の占積率から,実 効的な透磁率を与えて解析を行う.具体的には,鉄心占積 率をカタログに記載の 95%とし,積層方向には積層鉄心 と空気層を直列に接続した場合の透磁率を,面内方向には 積層鉄心と空気層を並列に接続した場合の透磁率を与え る.したがって,鉄心の透磁率 μ_{inp} は,それぞれ次式で与 えられる.

$$\mu_{lam} = \left(\frac{0.95}{\mu_s \mu_0} + \frac{0.05}{\mu_0}\right)^{-1} \tag{1}$$

(2)

$$\mu_{inp} = 0.95\mu_s\mu_0 + 0.05\mu_0$$



Fig. 4 Lamination of rotor core.



Fig. 5 Lamination of stator core.

Fig.6に電流密度対トルク特性に関して,先行研究の計算結果と,積層を考慮した場合の計算結果の比較を示す. 新たに積層を考慮したことで,高負荷領域における特性が低下し,より実機に近い特性が得られた.したがって,鉄心の積層を無視したことが計算値と実測値の誤差の要因の一つであることが明らかになった.

3.2 支持構造における渦電流の影響

続いて、モータの支持構造に発生する渦電流に着目した.前章で述べたように、試作機では、ハウジングや回転 子支持リング等の複数の金属部品がモータ本体に近接配 置されている.したがって、モータ本体からの漏れ磁束が これらの金属部品に流入し、渦電流が発生することが懸念 される.そこで、これらの金属部品も含めた 3D-FEM モ デルを作成し、渦電流を考慮した解析を行った.

Fig.7に,Fig.6に示した積層のみを考慮した場合のト ルク特性の計算結果と,積層に加えて支持構造の渦電流も 考慮した場合の計算結果を示す.支持構造の渦電流を考慮 したことで,積層のみを考慮した場合よりも,さらにトル ク特性が低下した.したがって,支持構造に発生する渦電 流は無視できないことが明らかとなった.

Fig.8に、各支持構造の渦電流損の比較を示す.この図 を見ると、主にモータ本体を格納するためのハウジング、







Fig. 7 Comparison of torque characteristics considering (improved II) or ignoring (improved I) the eddy current in holders and housing.

回転子外側を支持するためのアウターリングの 2 つの部 品において大きな渦電流損が発生していることがわかる. また,ハウジングの渦電流損は負荷に対して 2 次関数的 に増加しているが,アウターリングの渦電流損は負荷によ らず,ほぼ一定であることがわかる.

次いで,ハウジングとアウターリングの渦電流損が大き くなった原因について分析を行った.Fig.9に,U相を励 磁し鉄心が飽和している時の,ハウジングの渦電流分布を 示す.U相の固定子極があるバックヨークの背面を中心 として,大きな渦電流が流れている.Fig.10に,この時 のU相固定子極周辺の磁束密度分布を示す.この図を見 ると,固定子極だけでなくバックヨークにおいても磁気飽 和が起きており,これによりU相固定子極からハウジン グに漏れる磁束が生じたと推測できる.また,この漏れ磁 束はバックヨークの飽和の度合いで変化することから,ハ ウジングの渦電流損が負荷に対して2次関数的に増加し たと考えられる.

続いて, Fig. 11 に U 相励磁時のアウターリングの渦電 流分布を示す.同図に示すように,アウターリングは強度 を確保するため,回転子極間のスペースにもせり出した構 造になっているが,その部分に集中して渦電流が流れてい ることが了解される.すなわち,回転子周辺のフリンジン グ磁束がアウターリングに流れ込み,渦電流が生じたこと がわかる.



Fig. 8 Eddy current loss of each part.



Fig. 9 Eddy current distribution of the motor housing.



Fig. 10 Flux density distribution around U-phase stator pole.



Fig. 11 Eddy current distribution of the outer-ring.

3.3 回転子積層面内の渦電流損の影響

3.1 節では,鉄心の積層方向と占積率に着目したが,鉄 心に発生する渦電流損は考慮しなかった.固定子鉄心につ いては,積層面に垂直に鎖交する磁束は極めて小さいと考 えられるため,積層面内の渦電流は無視できる.しかし回 転子鉄心については,積層面に対して垂直な方向,すなわ ち回転方向から流入する磁束が存在するため,これにより 渦電流が発生することが懸念される.したがって,この渦 電流を考慮した解析を行った.ここで,一般に鉄心の積層 鋼板1枚1枚の面内渦電流をすべて解析する場合,多大 な計算リソースが必要となり,FEMの収束性が著しく低 下し,計算時間も長大化する.そこで今回は,回転子の積 層鋼板の両端2枚ずつ,計4枚の鋼板のみをモデル化し, ここで発生する渦電流を考慮した解析を行った.

Fig. 12 に, Fig. 6 に示した積層のみを考慮した場合 のトルク特性の計算値と,積層に加えて回転子の積層鋼板 の面内渦電流も考慮した場合の計算値を示す.この図を見 ると,両者の差はほぼ無いことが了解される.今回の解析 では,積層鋼板1枚あたりに発生する渦電流損は0.2 W 程度であり,トルク特性にはほとんど影響を与えなかっ た.

4. トルク向上に関する検討

前章までの考察により,固定子バックヨークの磁気飽和 に起因する漏れ磁束がハウジングに流れ込み,大きな渦電 流を発生させたことで,AFSRM のトルク特性が劣化し



Fig. 12 Comparison of torque characteristics considering (improved III) or ignoring (improved I) the eddy current in rotor laminated steel sheets.



Fig. 13 Comparison of flux density distribution around U-phase stator pole when a stator back yoke thickness is 7.5 mm (top) and 12 mm (bottom).

たことが明らかになった.この漏れ磁束は,バックヨーク での強い磁気飽和に起因することから,バックヨークを厚 くし,磁気飽和を緩和することで漏れ磁束が減って,ハウ ジングの渦電流損が低下し,結果的に電流密度対トルク特 性が改善すると考えられる.そこで,バックヨーク厚を 種々変更した FEM モデルを作成し,トルクの改善効果に ついて検証を行った.なお,バックヨーク厚を増加させた 分だけハウジングの厚さを減少させ,モータ全体の体格は 一定として比較を行った。

Fig. 13 に、バックヨーク厚を試作機と同じ7.5 mm とした場合と12 mm とした場合の磁束密度分布の比較を示す. この図を見ると、バックヨーク厚を増すことでヨークの磁束密度が低下し、磁気飽和が緩和されているのがわかる. また、Fig. 14 にバックヨーク厚を種々変えた場合のハウジングの渦電流損の比較を示す.バックヨーク厚を増し、磁気飽和を緩和したことで漏れ磁束が減り、その結果、渦電流損が大幅に低減したことが了解される.一方で、バ



Fig. 14 Comparison of eddy current loss of the housing in various thickness of the stator back yoke.



Fig. 15 Comparison of torque characteristics in various thickness of the stator back yoke.



Fig. 16 Comparison of torque weight density characteristics in various thickness of the stator back yoke.

ックヨーク厚を増すほど、低減効果は鈍化していくことから、磁気飽和の緩和による効果が得られるのは、ヨーク厚 12 mm 程度までであると考えられる.

次いで, Fig. 15 にバックヨーク厚を種々変えた場合の, AFSRM のトルク特性の比較を示す. バックヨークを厚く することで渦電流損が低減したため,同一トルク発生時の 入力電流が減り,その結果,トルク特性が改善されたこと がわかる.また Fig. 16 には,バックヨーク厚を種々変え た場合の, AFSRM のトルク重量密度特性の比較を示す. 鉄心体積の増加に伴いモータ重量が増加するが,ヨーク厚 10 mm 程度までは,トルク重量密度も改善されることが 了解される。

5. まとめ

以上,本稿では小型 EV 用ダブルステータ型 AFSRM の試作機のトルク低下要因の分析と,その結果を踏まえた 性能向上について検討を行った.

3D-FEM の解析により, 試作モータのトルク特性が設計値よりも低下した要因を分析した結果,先行研究では考慮されていなかった鉄心の積層構造,並びにハウジングや回転子支持リング等の構造部材で生じる渦電流損が,トルク低下の主な要因であることが明らかになった.また,ハウジングの渦電流損については,固定子バックヨークの強い磁気飽和に起因する漏れ磁束が原因であることも明らかになった.

次いで、上述の検討結果に基づき、ハウジングの渦電流 損を低減してモータのトルク向上を図るため、バックヨー ク厚について検討を行った.その結果、バックヨークを 7.5 mmから12 mm程度まで厚くすることで、固定子からの漏れ磁束が低減し、ハウジングの渦電流損が大幅に低 下するとともに、トルク特性も改善されることが明らかと なった.

今後は、さらなるトルク向上と損失低減に関して検討を 行うとともに、試作機を改造して実証実験を行う予定であ る.

References

- R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller: *IEEE Trans. Power Electron.*, 8, 257 (1993).
- Y. Ono, K. Nakamura, and O. Ichinokura: J. Magn. Soc. Jpn., 35, 2 (2011) (in Japanese).
- T. Shibamoto, K. Nakamura, H. Goto, and O. Ichinokura: Proc. IEEE Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM 2012), 1158-1163 (2012).
- K. Takase, H. Goto, and O. Ichinokura: *The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery*, RM-15-146 (2015). (in Japanese)

2019年10月10日受理, 2019年12月10日採録