

ワイドエアギャップ構造と不均一卷線を併用した 超低トルクリプル PM モータの検討

松浦 皓平*, 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Ultra-Low-Torque-Ripple PM Motor Taking Wide Air-Gap Structure and Non-Uniform Windings into Account
Kohei Matsuura, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. まえがき

精密ロボットの駆動に使われるモータでは、要求仕様を満たす平均トルク出力と同時に 0.1%未満の超低トルクリプルが求められる。従来は低コギングトルクと低トルクリプルを実現しやすいスロットレスモータが用いられてきたが、複雑な構造とコストがかかるという問題がある⁽¹⁾。そのため、インナーロットをもち高トルク密度かつ低トルクリプルを両立する永久磁石 (PM) モータの開発が求められている。本稿ではワイドエアギャップと不均一卷線を併用し、集中巻でありながら高トルク密度と超低トルクリプルを実現する PM モータを検討したので報告する。

2. 提案モータの概要

Fig. 1 にワイドエアギャップによる高調波起磁力の短絡経路を示す。同図に示すようにエアギャップを広げることによって磁石の高調波磁束をステータに鎖交させることなく、ギャップ内で短絡することができる。一般にエアギャップ長を広げることによってインダクタンス変動が低減するのでコギングトルクの低減とともに、磁石の高調波起磁力の短絡による低トルクリプルを実現することができる。一方で基本波鎖交磁束も減少するため、平均トルクの向上とトルクリプルの低減はトレードオフの関係にある。

筆者らは 2p6s のワイドエアギャップ構造を有した超高速モータの検討を行ってきた⁽²⁾。ワイドエアギャップを有する PM モータでは鎖交する高調波磁束が低減され、トルクリプルや鉄損を低減できる利点がある。一方、十分なトルク密度を確保できないという課題があるため、希土類 PM リッチな構成としなければならない。

本稿では、ワイドエアギャップ構造を有しながらも、トルクリプルの主因である 5 次成分の鎖交磁束をスロット毎の巻数の観点から低減し、トルク密度とトルクリプルを両立する設計手法について検討する。

提案するモータの要求仕様を Table 1 に示す。トルクリプル率の目標値が 0.05%と従来の PM モータと比較して極めて低いことが特徴である。そこで、提案モータは Fig. 2 に示す基準モデルと同様に、トルクリプルとモータ体格を低

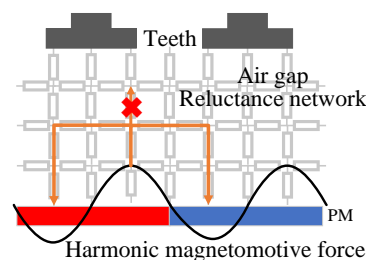


Fig. 1. Short circuit of harmonic magnetomotive force.

Table 1. Target specifications.

Average torque (Nm)	0.5
Torque ripple rate (%)	0.05
Current (A)	5
DC bus voltage (V)	24
Stack length (including coilend) (mm)	Less than 60
Stator outer diameter (mm)	$\phi 48$

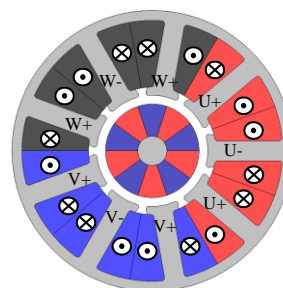


Fig. 2. Reference model.

減するため 10p9s 集中巻 SPM 構造を採用する。同図に示す基準モデルの巻線は全て 30 ターンとしており、本稿ではこの基準モデルと提案モータとの比較検討を行う。

3. 提案モータの導出

<3・1> 不均一卷線の検討

Fig. 3 にエアギャップ中の磁石による空間起磁力分布を示す。同図は U- に 5 次成分の磁束が最大に鎖交する場合を示している。このとき U+ 相の 5 次成分の磁束が最大に鎖交するときは機械角で 4 deg の位相差が存在する。これは電気角換算で 100 deg の位相差をもつことを意味する。したがって、5 次の総鎖交磁束 ψ_{U_5f} は下式で表すことができる。

$$\psi_{U-5f} = \psi_{5f} \cos(5\theta_e + 100) + \psi_{5f} \cos(5\theta_e) + \psi_{5f} \cos(5\theta_e - 100) \quad (1)$$

上式で第1項はU+, 第2項はU-, 第3項はU+の鎖交磁束を表している。ただし、 ψ_{5f} は5次鎖交磁束振幅、 θ_e は電気角である。

このときU-の鎖交磁束がU+に対して α 倍となるように巻数を調整したとすると、5次の鎖交磁束は下式で表すことができる。

$$\psi_{U-5f} = \psi_{5f} \cos(5\theta_e + 100) + \alpha\psi_{5f} \cos(5\theta_e) + \psi_{5f} \cos(5\theta_e - 100) \quad (2)$$

これよりU相の5次総鎖交磁束を0にするためには $\alpha = 0.347$ にすればよいことがわかる。

<3・2> バックヨーク磁気抵抗の検討

Fig. 4に提案モータのステータ巻線を示す。提案モータは前節で述べた通り、U+とU-の巻数の比率を1:0.347と設定することで、トルクリプルへの影響が大きい5次鎖交磁束を相殺することができる。この不均一巻線を実現するために、スロット面積を不均一にしている。

しかし、スロットを不均一にすることで各ティース間バックヨークの周方向長さが不均一になり、各ティース間の磁気抵抗に差が生じる。提案モータはこれを防ぐためにバックヨーク幅の調整を施している。

4. 電磁界解析結果

<4・1> 解析モデル

電磁界解析ソフト JMAG-Designer19.1™ を用いて解析を行った。U+とU-の巻数が各30ターンの基準モデルと、巻数及びバックヨーク磁気抵抗を調整した提案モデルの比較を行う。このときU+とU-の巻数をそれぞれ35ターン、12ターンとしている。

<4・2> 無負荷時解析結果

U相の無負荷鎖交磁束のFFT解析結果をFig. 5に示す。スロット形状を変更したため、総スロット面積がおおよそ9%減少した。そのため総巻数が基準モデルと比べ減少し、基本波鎖交磁束が減少したが、5次鎖交磁束はおおよそ95%減少することが確認できた。

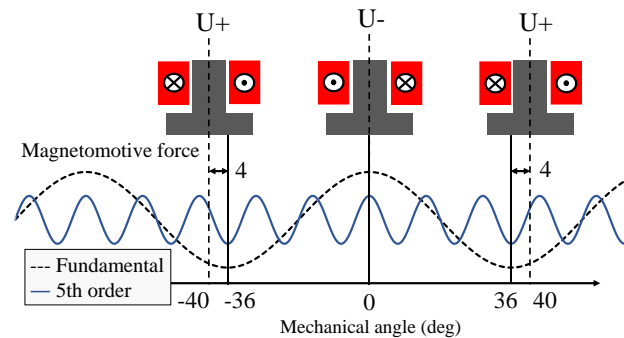


Fig. 3. Magnetomotive force distribution.

<4・3> 負荷時解析結果

5Aの電流をq軸に流したときの、トルク解析結果をFig. 6に示す。提案モータは基準モータに比べ、平均トルクが9.9%減少したものの、リプル率は0.113 pt低減することができトルクリプル率0.05%未満を達成した。

5. まとめ

本稿では、ワイドエアギャップ構造を用いても、除去が困難な5次鎖交磁束をスロット毎の巻数の観点から低減し、高トルク密度と超低トルクリプルを両立する設計手法について検討した。電磁界解析より、要求仕様の平均トルクとトルクリプル率を満たすことが確認できた。今後は、解析結果の妥当性について実機による検証を行う所存である。

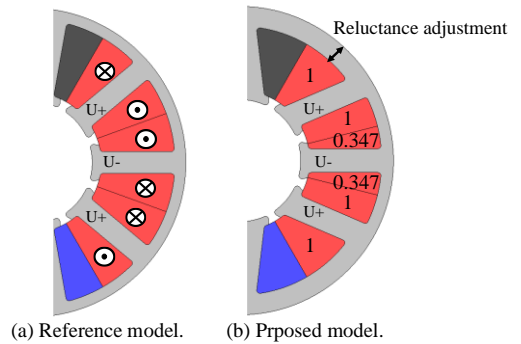


Fig. 4. Stator winding models.

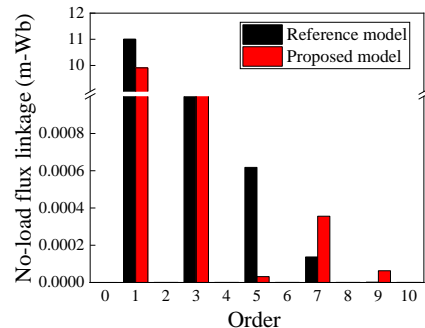


Fig. 5. No-load flux linkage of U-phase (FFT).

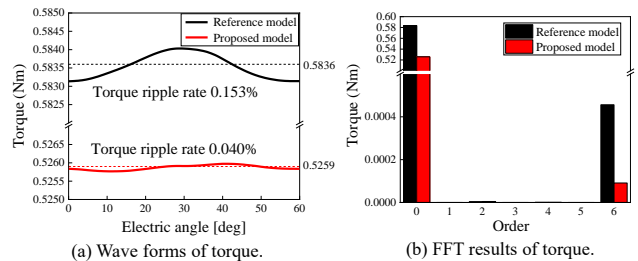


Fig. 6. Delivered torque characteristics.

文献

- (1) J.F. Gieras, I.A. Gieras, "Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor," *IEEE IAS Annual Meeting* (2002).
- (2) 藤田・野口: 「15-kW, 150,000-r/min 超高速 PM モータの電気機械両立設計」電気学会研究会資料 SPC/MD 合同研究会, SPC-19-141, MD-19-107 (2019).