

ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの基礎特性

秋本一輝, 中村健二, 一ノ倉理
(東北大学)

Basic Characteristics of Radial-Gap type Magnetic-Geared Motor

Kazuki Akimoto, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura
(Tohoku University)

1. はじめに

磁気ギヤは、非接触で増減速が可能であるため、騒音・振動が小さく、信頼性・保守性の向上が期待できる。また、トルク発生原理が一般的な永久磁石モータと同じであるため、モータとギヤを融合一体化した磁気ギヤードモータの実用化が期待される¹⁾。

本稿では、移動支援機器用のインホイールモータへの応用を目的として、ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの特性について検討したので報告する。

2. 磁気ギヤードモータのトルク特性

Fig. 1 に、ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの基本構成を示す。モータ部は、3相9スロット集中巻の固定子と4極対の高速回転子 (High speed rotor) で構成される。固定子鉄心の材質は無方向性ケイ素鋼板、磁石材料はネオジウム焼結磁石である。ギヤ部は、4極対の高速回転子 (High speed rotor) と23極対の低速回転子 (Low speed rotor)、ポールピースと呼ばれる27個の磁極片で構成される。ポールピースの材質は圧粉磁心、磁石材料はネオジウム焼結磁石である。同図に示すように、高速回転子 (High speed rotor) がモータ部とギヤ部で共有されている。

上述の構成で、固定子巻線に3相交流電流を入力すると、回転磁界に同期して高速回転子 (High speed rotor) が回転し、これがギヤ部で $1/5.75$ ($=4/23$) に減速されて、低速回転子 (Low speed rotor) から機械出力が得られる。

Table 1 に、ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの諸元を示す。体格や回転数などは、適用を想定している移動支援機器の要求仕様から決定した。目標トルクは、巻線電流密度が 10 A/mm^2 時に $5.81 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以上である。

Fig. 2 に、3次元有限要素法を用いて算定した、ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、目標トルクを上回っていることがわかる。今後は、実機の試作と実証実験を行う予定である。

なお、本研究の一部は、科研費挑戦的萌芽 (26630103) の交付を得て行った。

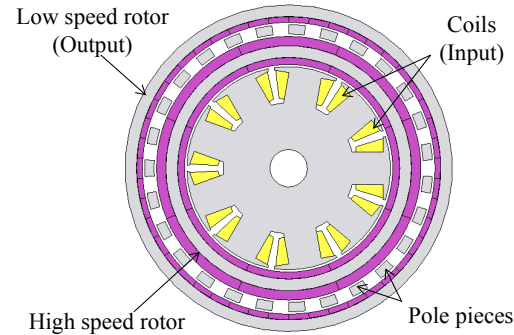


Fig. 1 Basic configuration of a radial-gap type magnetic-geared motor.

Table 1 Specifications of the radial-gap type magnetic-geared motor.

Diameter	140 mm
Axial length	15 mm
High speed rotor	632.5 rpm
Low speed rotor	110 rpm
Number of turns/pole	62 turns/pole
High speed rotor magnet pole pairs	4
Low speed rotor magnet pole pairs	23
Pole piece number of poles	27
Gear ratio	5.75
Gap length	$1.0 \text{ mm} \times 3$
Material of magnet	Sintered Nd-Fe-B
Material of PP	Soft magnetic composite
Material of yoke and stator	Non-oriented Si steel

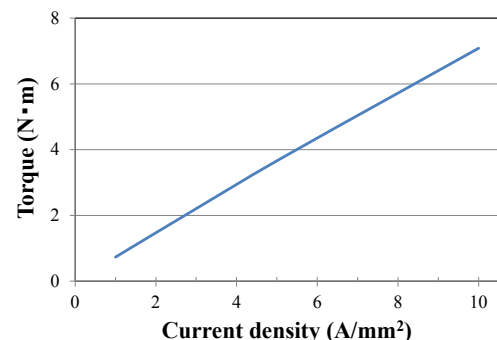


Fig. 2 Calculated torque characteristic of the radial-gap type magnetic-geared motor.

参考文献

1) K. Nakamura, K. Akimoto, T. Takemae, O. Ichinokura, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, **39**, 29 (2015).

電動工具用高速 SR モータの試作試験

熊坂悠也, 磯部開太郎, 中村健二, 一ノ倉 理
(東北大学)

Prototype Tests of High-Speed SR Motor for Electric Power Tools

Y. Kumasaka, K. Isobe, K. Nakamura, O. Ichinokura
(Tohoku University)

はじめに

スイッチトリラクタンス (SR) モータは、固定子、回転子ともに突極構造を有し、磁気抵抗の変化に起因するリラクタンストルクを利用して回転する。巻線は固定子極のみに集中巻される。また、回転子は鉄心のみで構成され、巻線や永久磁石は不要である。したがって、SR モータは構造が極めて簡単で堅牢、安価、高速回転に適するなどの特長を有する。

先に筆者らは、電動工具への応用を目的として、有限要素法 (FEM) を用いて SR モータを解析・設計した結果、既存の永久磁石 (PM) モータに匹敵するトルクを有することを明らかにした¹⁾。

本稿では、上記の検討結果に基づき試作した SR モータの実証実験の結果について報告する。

試作 SR モータの諸元と試験結果

Fig. 1 に、試作した固定子 12 極、回転子 8 極の 3 相 SR モータの諸元を示す。鉄心材料は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板である。Fig. 2 は、実際の電動工具に用いられている PM モータである。これら 2 つのモータのコイルエンドまで含めた体格は等しい。一方、SR モータはオープンスロット構造であるため、試作機の巻線占積率は約 44% であり、PM モータの 24% よりも高い。また、ギャップ長は PM モータよりも短い。

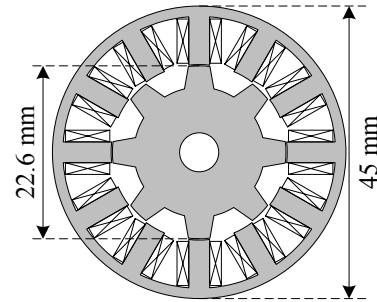
Fig. 3 に、巻線電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、ほぼ設計通りのトルクが得られていることがわかる。また、高負荷側で PM モータのトルクを上回っていることが了解される。

まとめ

以上、電動工具用高速 SR モータの試作試験の結果について述べた。

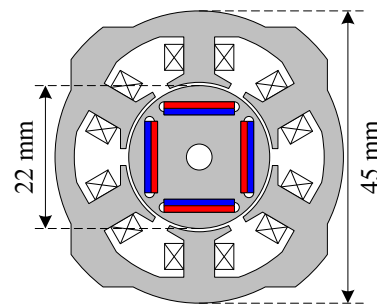
参考文献

- 1) K. Isobe, K. Nakamura, O. Ichinokura, "A Consideration of High-Speed SR Motor for Electric Power Tools", *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 38, No. 5, pp. 194-198 (2014).



Axial length	17.85 mm
Gap length	0.2 mm
Core material	35A300
Winding space factor	44.3%

Fig. 1 Specifications of a prototype SR motor.



Axial length	17.85 mm
Gap length	0.5 mm
Magnet material	Nd-Fe-B
Winding space factor	24.0%

Fig. 2 Specifications of a present PM motor.

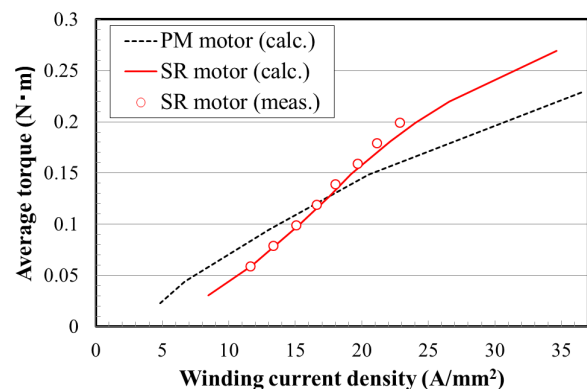


Fig. 3 Comparison of winding current density versus speed characteristics.

アキシヤルギャップ型 SR モータの騒音に関する実験的研究

伊東宏祐, 後藤博樹, 一ノ倉理
(東北大学)

Experimental study of Acoustic Noise from an axial-gap SR motor

K. Ito, H. Goto and O. Ichinokura
(Tohoku University)

はじめに

近年、磁石を一切用いないため堅牢かつ構造が簡単でコストが安いスイッチトリラクタンス (SR) モータが注目を集めている。筆者らは、インホイールダイレクト駆動方式の電気自動車用モータとして、扁平空間でも高トルク密度を有するアキシヤルギャップ型 SR モータを提案し、試作・走行試験において有用性を確認してきた¹⁾。しかし、駆動時における振動や騒音が非常に大きいという欠点があり、これは実用化に向けて解決すべき課題である。本稿では、上記の試作アキシヤルギャップ型 SR モータの騒音の原因を調査すべく、分析を行ったので報告する。

SR モータの騒音分析

Fig. 1 に、現有の試作 SR モータの基本構成を示す。固定子 18 極、回転子 12 極であり、1つの固定子に軸方向に 2 つの回転子を挟み込んだダブルロータ型モータである。Fig. 2 に実験装置の外観を示す。モータをダイナモメータに接続して負荷を印加し、回転数をパラメータとしたときの騒音を測定した。得られた波形をフーリエ変換し、回転数毎の騒音レベルの推移を調べた。騒音測定結果を Fig. 3 に示す。X 軸は騒音に含まれる周波数 [Hz], Y 軸はモータの回転数 [r/min], Z 軸は騒音レベル [dB] を示している。ここで、回転子極数 p_r , 回転数 n_r [r/min], 相数を $k (=3)$ とすると、モータの電磁力の基本周波数は(1)式で表される。

$$f_1 = \frac{kp_r n_r}{60} \quad (1)$$

同図(a)を見ると低周波領域では、回転数に応じて上式の次数倍の成分に沿った高調波が観測されていることが分かる。これはモータの電磁力に起因しているものだといえる。同図(b)に高周波領域も含めた騒音分布図を示す。2000[Hz]および3000[Hz]に主要となる高調波成分が確認された。今後は静音化に向け、この主要となる成分についての原因分析を検討している。

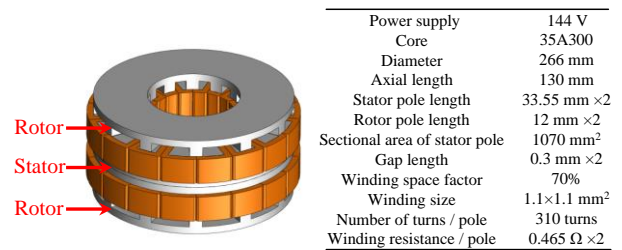


Fig. 1 Specification of 18/12 axial-gap SR motor.

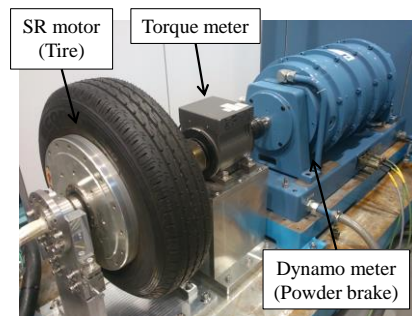


Fig. 2 General view of the experimental system.

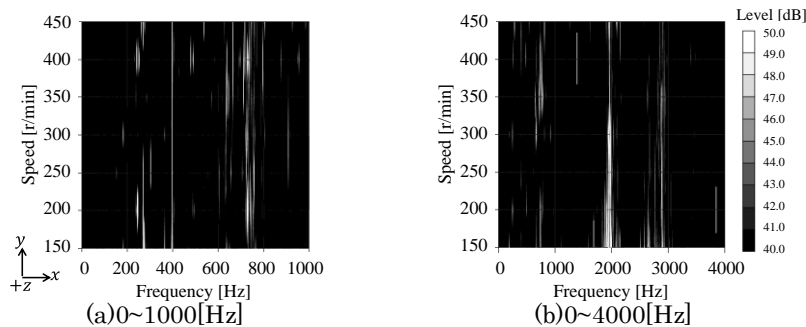


Fig. 3 Experimental Result of Sound pressure level.

参考文献

- 1) T. Shibamoto, K. Nakamura, H. Goto and O. Ichinokura, ICEM 2012, FF-001678 (2012).

RNA における誘導モータの解析精度向上に関する検討

梅坂 智之, 田島 克文, 吉田 征弘
(秋田大学)

Study on the analysis accuracy improvement of induction motor in Reluctance Network Analysis

T.Umesaka, K.Tajima, Y.Yoshida
(Akita Univ.)

はじめに

近年, 地球温暖化対策, エネルギー消費抑制の観点から, 電気機器の高効率化が求められている¹⁾. 回転機の電力消費量は, 日本国内の消費電力の60%を占めており, モータの高効率化が与える影響は大きいと考えられる²⁾.

筆者らは先に, 誘導モータの高効率化を検討するため, かご形回転子駆動時におけるモータ特性の高速計算が可能な, 磁気抵抗回路網解析(Reluctance Network Analysis)の適用を提案した³⁾.

本稿では, 従来の解析モデルで考慮されていなかった, かご形回転子における導体バー付近の磁束分布, 及びスキューを考慮した解析モデルを提案し, モータ特性の解析精度向上を図ったので報告する.

解析手法

供試モータは東芝製のコンデンサ始動形コンデンサランモータ (SKD-DBKK8) である. 供試モータの仕様・寸法を Table 1 に示し, 固定子および回転子の構成図を Fig. 1 に示す.

Table 1 Specification of a specimen motor.

Parameter	Value	Parameter	Value
Frequency	50 Hz	Number of stator slots	36
Voltage	100 V	Internal diameter of stator	45.0 mm
Current	12.6 A	Outer diameter of stator	73.0 mm
Output	750 W	Gap width	0.3 mm
Number of poles	4	Number of rotor slots	44
Running capacitor	40 μ F	Outer diameter of rotor	44.7 mm
Starting capacitor	350 μ F	Iron core length	93.0 mm

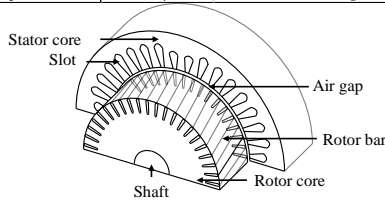


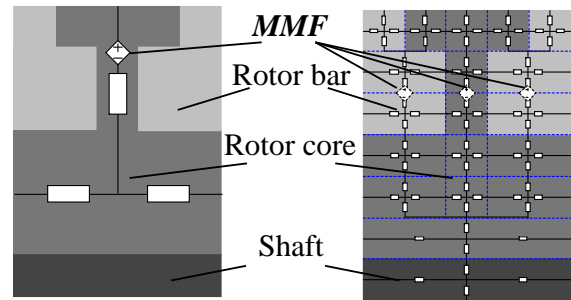
Fig. 1 Stator and rotor of capacitor motor.

RNA モデルは, 固定子と回転子を形状に合わせて分割し, それぞれの分割要素を寸法・材質から求めた単位磁気回路で置き換えることで全体を磁気回路網で表したものである.

かご形回転子の磁気回路モデルとして, 文献 3) の従来モデルでは Fig. 2(a) に示す簡単な磁気回路を用いた. 図中の起磁力源(MMF)は誘導電流による反作用磁界を表現するものである.

これに対し, 同図(b)の提案モデルでは, 導体バーを含む回転子内の磁束分布をより詳細に考慮できるよう, 解析領域を細分化した. また, 回転子導体バ

ーの2スロットスキューを考慮するため, 回転子は軸方向に3分割し, 各々の磁気回路は軸方向接続部で1スロット分回転させている.



(a) Previous model. (b) New model.

Fig. 2 Magnetic circuit model 1/44 rotor.

解析結果

回転子拘束時, 無負荷時(同期速度回転時)について提案モデルに実験値の入力電圧を与え, 主巻線電流 I_m [A], 補助巻線流 I_a [A] の計算を行い, 実験値, 文献 3) の従来モデルと比較した結果を以下に示す.

Table 2 I_m and I_a of the motor with rocked rotor. (Input voltage 25.6[V_{rms}])

	I_m [A _{rms}]	I_a [A _{rms}]
Meas.	12.6	3.45
Previous model.	18.1	2.68
Suggestion model.	14.4	4.04

Table 3 I_m and I_a of the motor under no-load. (Input voltage 100[V_{rms}])

	I_m [A _{rms}]	I_a [A _{rms}]
Meas.	7.35	2.57
Previous model.	6.45	2.66
Suggestion model.	6.72	2.57

まとめ

提案手法により回転子拘束時, 同期速度回転時のモータ電流が概ね良好に計算できた.

参考文献

- 1) 伊藤, 森永: “モータの高効率化”, 日本 AEM 学会誌, Vol.7, No.3, pp269-272 (1999)
- 2) 新機能素子研究開発協会: 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査<調査報告書> (2009)
- 3) K. Tajima, and T. Sato: J. Magn. Soc. Jpn., 34, 367-373(2010)

RNAに基づく二直線近似を用いたフェライト磁石の減磁解析

門間大樹, 吉田征弘, 田島克文
(秋田大学)

Demagnetizing Analysis of the Ferrite Magnet Using Two-Line Approximation Based on RNA

D.Momma, Y.Yoshida, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

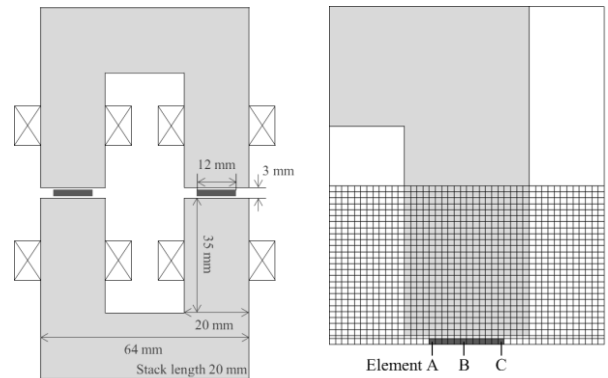
希土類磁石の価格高騰や供給不安定の問題から、フェライト磁石を用いたモータの高性能化が進められているが、フェライト磁石は外部磁界によって減磁しやすいため、減磁を考慮した設計が必要になる。筆者らは、RNA(Reluctance Network Analysis)を用いた永久磁石モータの損失算定について検討を進めているが¹⁾、外部磁界による減磁を考慮した解析手法はまだ確立されていない。そこで本稿では、RNAと二直線近似を用いた減磁解析手法を示し、有限要素法(FEM)による算定結果と比較を行うことで、その有用性について検討を行ったので報告する。

RNAによるフェライト磁石の減磁解析

Fig.1(a)に解析モデルの形状を示す。断面が20mm×20mmのU字型鉄心に断面が12mm×20mm、厚さが2mmのフェライト磁石(SSR-420)が挟まれており、鉄心のそれぞれの脚に20ターンの巻線が施されている。同図(b)にRNAに基づく要素分割を示す。モデルの対称性から1/4モデルとし、磁束の分布が複雑となるギャップ周辺は細かく分割している。

Fig.2を用いて二直線近似による磁石動作点の計算方法を説明する。まず、外部磁界がない場合の磁石動作点aから垂線を伸ばし、J-H特性との交点bを求め、交点bと原点を通る直線を l_0 とする。次いで、巻線に電流を流したときの外部磁界 H_{ex} を求め、 l_0 と傾きが等しく、 H_{ex} を通る直線 l_1 とJ-H特性との交点をcとすれば、点cから垂線を下ろしてB-H特性と交わる点dが磁石動作点となる。ここから外部磁界を再び0にすると磁石動作点は点eとなる。

Fig.1の計算モデルを用いて、磁石の磁化方向とは逆向きの磁束が発生するように、起磁力が230Aになるようなノコギリ波電流を3周期流して磁石動作点を算定し、フェライト磁石の減磁評価を行った。Table 1に、Fig.1に示した3つの要素の減磁率の計算結果を示す。この表をみると、どの要素もFEMの計算値と概ね一致しており、提案する手法が減磁の評価に適用可能であることが示された。



(a) Shape of the model. (b) Division of the RNA model.

Fig.1 Shape and division of analytical model.

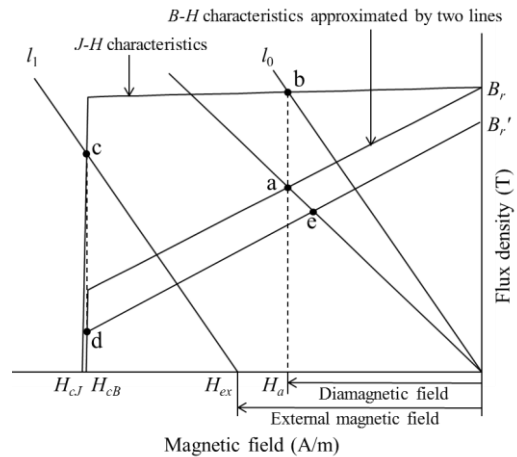


Fig.2 Operation point of the magnet.

Table 1 Calculation results of the demagnetizing factor at the magnetomotive force of 230A.

	Element A [%]	Element B [%]	Element C [%]
RNA	21.3	26.2	21.3
FEM	22.0	28.4	22.0

参考文献

- 1) Y. Yoshida, K. Nakamura, O. Ichinokura, Katsubumi Tajima, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 6, pp.422-427 (2014)