

アキシアルギャップ誘導モータの基礎特性解析に関する研究

酒井諒典, 吉田征弘, 田島克文
(秋田大学)

A Study on Analysis of Basic Property of Axial Gap Induction Motor

R.Sakai, Y.Yoshida, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

誘導モータ (IM) は堅牢で安価なモータとして広く使用されている。アキシアルギャップ誘導モータ (AGIM) はダブルロータ構造とすることで各回転子に異なる回転速度を設定することが可能であるなどの利点が報告されている¹⁾。本稿では、誘導モータの高トルク密度化を目指し、分布巻と同様の起磁力分布が得られ、かつ占積率向上が期待できる巻線方式であるトロイダル巻²⁾を用いた新構造の AGIM を提案し、有限要素解析 (FEA) にて従来のラジアルギャップ誘導モータ (RGIM) と基礎特性の比較を行ったので報告する。

アキシアルギャップ誘導モータの設計・解析

Fig.1 に比較対象である従来の RGIM の形状を示す。直径 100 mm, コア積厚が 30 mm, 固定子と回転子間のギャップは 0.35 mm である。巻線方法は分布巻, 占積率は 11 % で, コアからはみ出したコイルエンドの寸法は軸方向両側に 14 mm である。

Fig.2 に提案した AGIM の構造を示す。ギャップ長, 回転子導体の断面積は RGIM と等しく設定し, 外径はコイルエンドまで含めて 100 mm, 軸長は RGIM のコア積厚と同等の 30 mm とコイルエンドを含めた軸長と同等の 58 mm の 2 パターンを検討した。巻線方法はトロイダル巻を用い, 占積率 40 % として設計した。トロイダル巻によって固定子の両平面に回転磁界を発生させることができるため, 回転子を 2 つ配置するダブルロータ構造とした。

Fig.3 に FEA によって解析した s - T 特性を示す。RGIM, AGIM (30 mm), AGIM (58 mm) の最大トルクはそれぞれ 0.617 Nm, 0.686 Nm, 1.266 Nm であり, AGIM (58 mm) は RGIM と同等の体格で最大トルクが約 2 倍であった。Table 1 にトルク密度の比較を示す。AGIM (30 mm) は RGIM とほぼ同等の最大トルクであるが, コイルエンド分体積が小さくなり, トルク密度は 2 倍以上の値となった。

本検討により, 提案した AGIM がトルク密度向上に有用であることが解析によって示された。

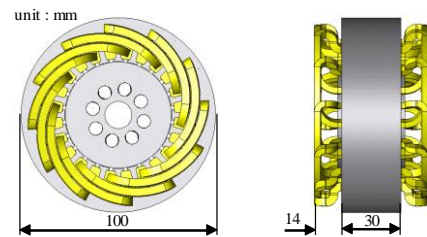
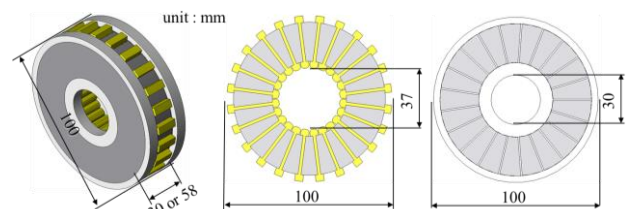


Fig.1 Shape and specification of RGIM to be compared.



(a) Overview (b) Stator (c) Rotor

Fig.2 Construction of proposed AGIM.

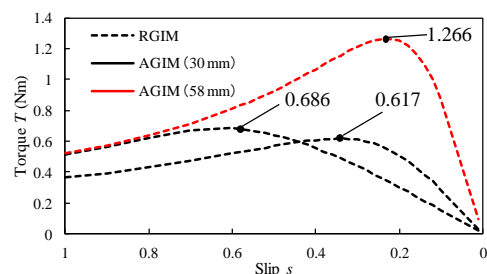


Fig.3 Comparison of Torque-Slip characteristics.

Table 1 Comparison of torque density.

	RGIM	AGIM (30 mm)	AGIM (58 mm)
Torque density (Nm/L)	1.470	3.159	3.015
Torque density ratio	1	2.149	2.050

参考文献

- 1) Durgesh Kumar Banchhor *et al.*, 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), DOI: 10.1109/EPETSG.2015.7510124
- 2) 岩井優樹, 吉田征弘, 田島克文, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-15-117 (2015)

三次元磁石配置による高効率レアアースフリーモータの開発

齊藤秀和, 吉田征弘, 田島克文
(秋田大学)

Development of a High Efficiency Rare Earth Free Motor by Three Dimensional Magnet Arrangement

H.Saito, Y.Yoshida, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

現在, 広く普及している永久磁石モータには希土類磁石が使用されているが, 希土類磁石は価格や供給の面で問題が顕在化しているため, 希土類磁石を使用しない高性能レアアースフリーモータの研究が進められている¹⁾. 過去の研究では固定子巻線に着目し, トロイダル巻線方式によりフェライト磁石モータの損失低減を実現した²⁾. 本研究では回転子に着目し, 磁石配置を三次元的に考えることで, モータ性能の更なる向上を検討した.

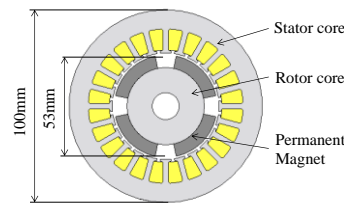
三次元磁石配置モデルの検討

Fig.1に比較対象のSPMモータの形状と諸元を示す. 固定子巻線は分布巻であり, 比較検討のため, 永久磁石はフェライト磁石とネオジウム焼結磁石を用いた. Fig.2(a)に提案モデルの固定子を示す. 固定子の外径と積厚は SPM モータと等しく, 巻線方法はトロイダル巻を用いた. 同図(b)に提案モデルの回転子形を示す. 三次元方向(軸方向)に磁石6mm, ヨーク厚3mmのユニットを配置することで磁石表面積が増加し, フェライト磁石のみでもトルクの向上が可能となる.

Fig.3(a)に $N-T$ 特性を示す. SPMモータ(Ferrite), SPMモータ(Neodymium), 提案モデルの最大トルクはそれぞれ 0.52Nm, 1.52Nm, 0.93Nmであった. また, 提案モデルが出力可能な動作点 A, B, Cにおける損失の比較を Fig.3に示す. 提案モデルは SPMモータ(Ferrite)に比べ銅損を大幅に低減できていることがわかる. SPMモータ(Neodymium)と比べても同程度の銅損であり, 鉄損が小さいため, 提案モデルは各動作点で効率が比較対象の SPMモータよりも向上することが明らかになった. この結果から, 提案モデルは希土類磁石を使用せずに希土類磁石を使用したモータと同等以上の高効率を達成可能であることが示された.

参考文献

- 1) 真田雅之, 井上征則, 森本茂雄: 「フェライト磁石を用いた高性能 PMASynRM の構造と特性」 電学論 D, Vol.131 No.12 PP.1401-1407
- 2) 岩井優樹, 吉田征弘, 田島克文: 「トロイダル巻線を用いたフェライト磁石モータの高効率化に関する考察」, MAG-15-117 (2015)



Stack length	30mm
Permanent magnet material	SSR-420 or NEOMAX-42
Core material	50JN1300
Number of slots	24
Number of poles	4
Winding method	distributed
Number of winding turns / slot	40 turns

Fig.1 Shape and specification of SPM motor

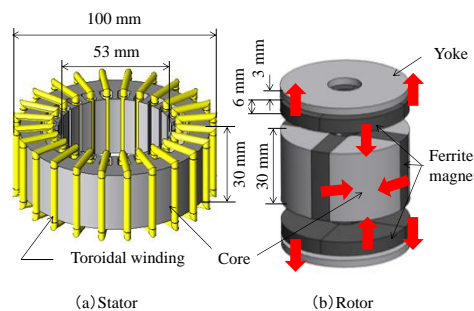
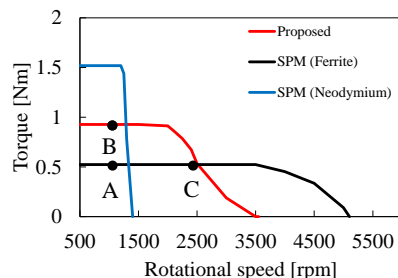
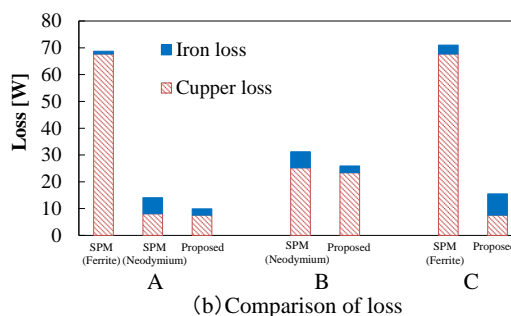


Fig.2 Shape of Proposed model



(a) Torque speed characteristic



(b) Comparison of loss

Fig.3 Comparison of characteristics

リラクタンスネットワーク解析に基づく 巻線界磁型クローポールモータの特性算定

市川優太, 中村健二,*鄭 浙化, *栗本直規
(東北大学,*(株)デンソー)

Performance Calculation of Field-Winding type Claw-Pole Motor based on Reluctance Network Analysis
Y. Ichikawa, K. Nakamura, *S. Jung, *N. Kurimoto
(Tohoku University, *DENSO CORPORATION)

はじめに

近年、モータの小型高出力化の要求に対し、構造を3次元化することで、鉄心と巻線の空間利用率を高め、トルクを向上させるアイデアがいくつか報告されている^{1),2)}。その中の一つである、界磁巻線型クローポールモータは、爪状の極を上下でかみ合わせた特殊な構造の回転子鉄心の中に同心円状に巻いた界磁巻線を取めることができるため、巻線占有率を大幅に高めることができる。また、界磁電流を調整することで、一般的な永久磁石界磁型のモータよりも広範囲な速度制御性を有する。しかしながら、本モータの特性算定には、3次元解析が必須であること、また電機子電流に加え、界磁電流も制御パラメータとなるため、諸特性を算定するためには、駆動回路も含めた高速・高精度な解析が必要不可欠である。そこで本稿では、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) に基づくクローポールモータの特性算定について検討を行ったので報告する。

RNA によるクローポールモータの解析設計

Fig. 1 に、クローポールモータの基本構成を示す。磁気的な対称性を勘案して、Fig. 2(a)に示すように解析には 1/8 モデルを用いた。また同図(b)に示すように、RNA モデルの導出に際しては、斜めになっている爪状の極を階段状に近似した。Fig. 3(a)に、RNA に基づくクローポールモータの分割図、および分割数を示す。同図に示すように、モータを複数の要素に分割し、各々の要素を同図(b)に示すような3次元の単位磁気回路で表す。ここで、図中の磁気抵抗は分割要素の寸法と材料の $B-H$ 曲線から求めることができる。なお、ここでは回転子鉄心については磁気特性の非線形性を考慮し、固定子鉄心については無視している。

導出したクローポールモータの RNA モデルの妥当性について評価するため、有限要素法 (FEM) の結果と比較検討を行った。なお、FEM の解析形状は、Fig. 2(b)に示した RNA モデルと同一とした。Fig. 4 に界磁電流 3A、回転数 450 rpm で駆動させた場合の電機子電流対トルク特性の結果を示す。この図を見ると両者はよく一致しており、RNA の妥当性が了解される。また、両手法の計算時間は FEM がおよそ 21 時間であったのに対し、RNA は 10 分程度であり、99%以上の計算時間の短縮が図れた。

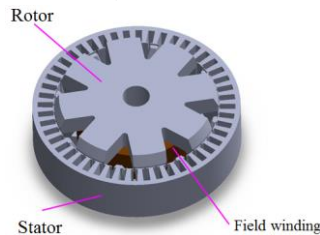


Fig. 1 Basic configuration of a claw-pole motor.

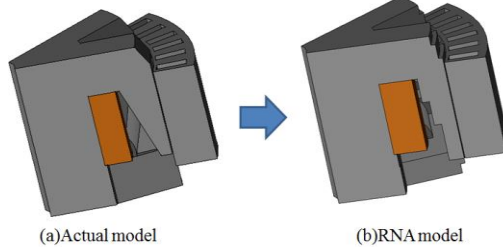
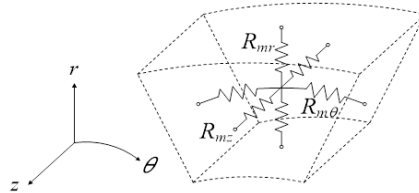


Fig. 2 RNA model of the claw-pole motor.

Number of division	r	θ	Z
Stator	4	60	1
Gap	1	60	5
Rotor	4	15~60	5
Field side	12		

(a)The motor division based on RNA



(b)Three-dimensional unit magnetic circuit

Fig. 3 Motor division and unit magnetic circuit based on RNA.

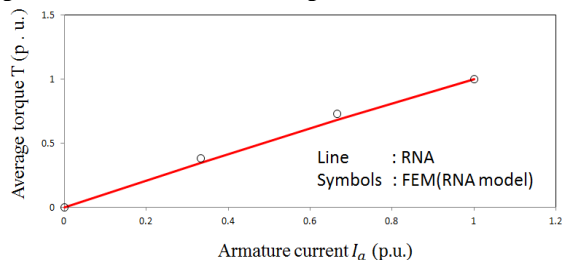


Fig. 4 Armature current versus torque characteristics.

参考文献

- 1) 榎本裕治, 床井博洋, 小林金也, 天野寿人, 石原千生, 安部恵輔, 電学論 D, **129**, 1004 (2009).
- 2) 井上正哉, モータ技術シンポジウム, **30**, C5-3-1 (2010).

リラクタンスネットワーク解析による ヒステリシスモデリングに関する検討

羽根 吉紀, 田中 秀明, 中村 健二
(東北大学)

Hysteresis Modeling for Reluctance Network Analysis

Y. Hane, H. Tanaka, K. Nakamura

(Tohoku University)

駆動における電磁鋼板の鉄損評価解析, 電学研資 SA-13-6, RM-13-6 (2013)

はじめに

電気機器の研究開発において、磁気ヒステリシスを含む鉄損を定量的に算定可能な手法の確立が求められている。先行研究では、磁気ヒステリシスを表現可能なモデルの一つである、プレイモデル¹⁾を取り入れた磁気回路モデルが提案され、リアクトルのヒステリシスループを高速かつ高精度に算定可能であることが明らかになった²⁾。

そこで本稿では、モータ等、より複雑な形状を有する電気機器の解析に対しても、上述の手法を適用することを目的として、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) にプレイモデルを取り入れることについて検討を行ったので報告する。

プレイモデルを取り入れた RNA モデル

Fig. 1 に、先行研究で提案されたプレイモデルを取り入れた磁気回路モデルを示す。本モデルにおいて、直流ヒステリシスはプレイモデルで表し、渦電流損失および異常渦電流損失は回路素子で表す。なお、一般にプレイモデルの導出には、最大磁束密度の異なる多数の直流ヒステリシスループの実測データが必要になるが、本手法では簡略化の仮定を取り入れた LLG 方程式³⁾を用いて直流ヒステリシスループを算定するため、必要最小限の実測データからプレイモデルを導出することができる。

Fig. 2 に、実験に用いた板厚 0.20 mm の無方向性ケイ素鋼板のリアクトルおよびその RNA モデルを示す。分割した要素の各非線形磁気抵抗は、同図に示すように、プレイモデルと渦電流損失および異常渦電流損失を表す回路素子で与える。

Fig. 3 に、PWM 励磁時のヒステリシスループの観測波形と計算波形を示す。この図を見ると、RNA モデルにより、マイナーループを含むヒステリシスを精度良く算定可能であることが了解される。

参考文献

- 1) S. Bobbio, G. Miano, C. Serpico and C. Visone: "Models of Magnetic Hysteresis Based on Play and Stop Hysteron", *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4417 (1997).
- 2) 田中, 中村, 一ノ倉: 「LLG 方程式から得られたプレイモデルを用いた磁気回路解析」, 電気学会全国大会講演論文集, 1-018 (2016)
- 3) 古屋, 藤崎, 上原, 清水, 大島, 村上, 高橋: 「高周波

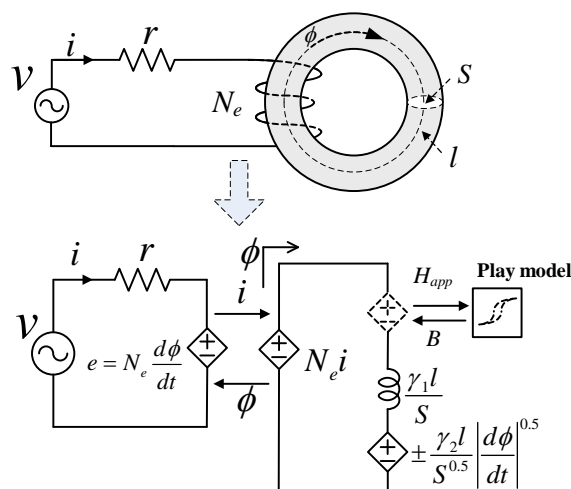


Fig. 1 Magnetic circuit model Incorporating Play model.

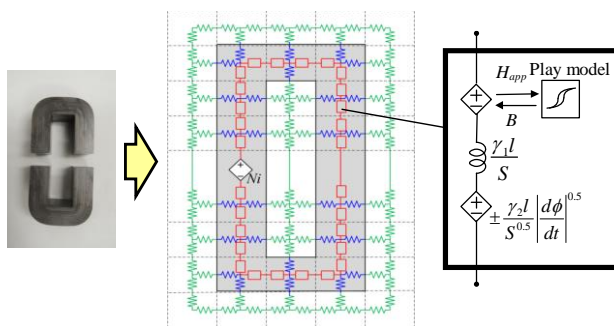


Fig. 2 RNA model Incorporating Play model.

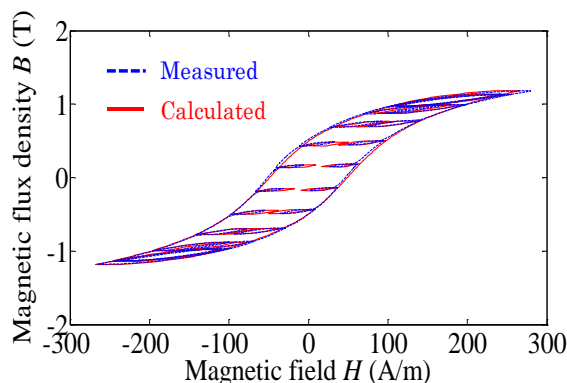


Fig. 3 Comparison of measured and calculated hysteresis loops.

リラクタンスネットワーク解析に基づく 永久磁石モータの熱-磁気連成解析に関する検討

川村恭平, 中村健二
(東北大学)

Electromagnetic and thermal Coupled Analysis for PM Motor based on Reluctance Network Analysis
K. Kawamura, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

近年、産業・民生・運輸の様々な分野で、モータの需要が拡大している。その中でも、永久磁石 (PM) モータは、他のモータと比べて、小型高出力・高効率であることから利用が増大している。一方、さらなる小型高出力化の要求に伴い、PM モータの損失、特に磁石に流れる渦電流による発熱によって、磁石が熱減磁する問題が顕在化している。したがって、PM モータの最適設計には、熱の影響も定量的に把握する必要がある。

これまで筆者らは、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) に基づき、モータの磁気回路網と熱抵抗回路網を連成・連携させることで、スイッチトリラクタンス (SR) モータ¹⁾や、PM モータ²⁾の温度上昇を算定する手法について検討を進めてきたが、磁石渦電流損失まで考慮したPMモータの熱-磁気完全連成解析については、いまだ確立されていない。本稿では、磁石渦電流損失まで考慮可能な熱-磁気連成解析モデルの構築を目指し、基礎的な検討を行ったので報告する。

RNA に基づく PM モータの磁石磁束の算定

Fig. 1 に、考察に用いた 3 相 6 スロット 4 極の外ロータ型 PM モータを示す。Fig. 2 は、PM モータの RNA モデルの一部である。磁石渦電流損失を算定するためには、回転子の回転運動に伴って移動する永久磁石の各部に流れ込む磁束を求める必要がある。本モデルでは、この磁石各部に流れ込む磁束を計算するブロックを新たに加えた。

Fig. 3 に、磁石表面のある箇所流れ込む磁束の計算波形の一例を示す。比較のため、有限要素法による計算波形も併せて示す。この図を見ると、両者は良く一致しており、モデルの妥当性が了解される。今後は、この磁束を用いて、磁石渦電流を計算する回路を構築することで、渦電流損失を求めるとともに、熱抵抗回路網との同時連成解析の実現を目指す。

参考文献

- 1) 菅井悠史, 中村健二, 一ノ倉理, “熱 - 磁気回路網による SR モータの温度解析に関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-14-168 (2014)
- 2) 菅井悠史, 中村健二, 一ノ倉理, “熱回路網解析による表面磁石モータの温度上昇算定”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-15-120 (2015)

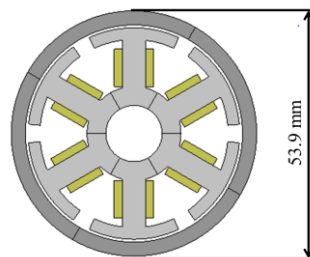


Fig. 1 Schematic diagram of outer-rotor-type PM motor.

Table. 1 Specifications of the PM motor.

Number of slot	6
Number of pole	4
Stack length	11.9 mm
Number of windings/pole	48
Magnetic length	3 mm
Core material	35A300
Magnet material	Nd-Fe-B

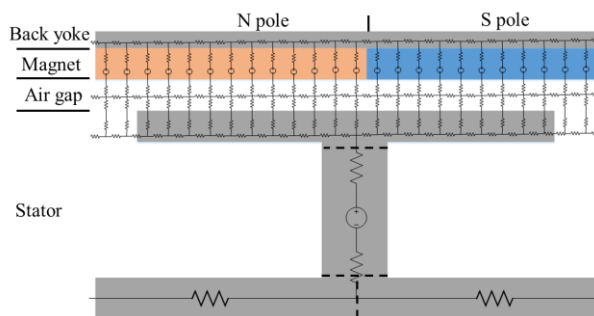


Fig. 2 A part of the RNA model of the PM motor.

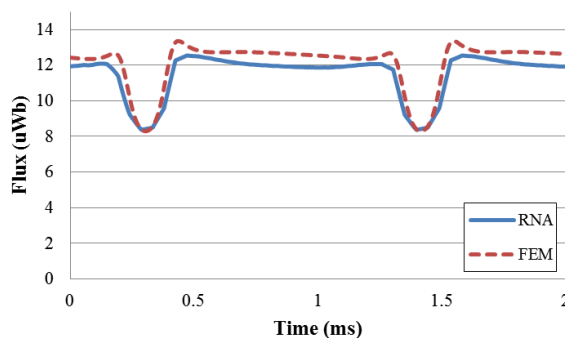


Fig. 3 Comparison of calculated fluxes flowing into a certain part of the magnet.