

フラックスリバーサルモータの最適な回転子極幅に関する一考察

Optimum Rotor Pole Width of Flux Reversal Motors

角田捷太郎[†]・中村健二

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

S. Tsunoda[†], K. Nakamura

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

The electrification of various types of vehicles, e.g., electric vehicles (EVs), is being promoted. Compact EVs have gained popularity in recent years because they consume less battery power and can be priced similarly to gasoline-powered vehicles. This study focuses on in-wheel direct drive systems, which are suitable for compact EVs and do not require gears or transmissions. As a candidate for in-wheel motors, the authors focused on flux reversal (FR) motors, a type of doubly-salient permanent magnet (PM) motor with the same salient rotor as switched reluctance (SR) motors. FR motors are expected to meet the wide speed-torque range required for EVs. In this paper, the optimum rotor pole width for FR motors, in terms of torque, back-EMF, cogging torque, and torque ripple, is investigated using two-dimensional finite element analysis (2D-FEM).

Key words: Flux reversal (FR) motor, Electric vehicle (EV), In-wheel motor

1. はじめに

電気自動車 (EV) や航空機など, 各種移動体の電動化が推進されている. EV のホイール内にモータを搭載して直接タイヤを駆動する, いわゆるインホイールダイレクトドライブ方式はギヤやトランスミッションが不要になるため, 効率や静粛性に優れ, 車内空間の設計自由度も高まる. また, 各輪独立制御が可能であることから自動運転との親和性が高く, 次世代の EV 駆動方式として期待されている.

インホイールモータの候補として, スイッチトリラクタンズ (SR) モータや永久磁石 (PM) モータが挙げられる. 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. また, 弱め界磁制御無しに高速域まで運転可能である. しかしながら, SR モータは一般的な PM モータと比較してトルク密度が低く, 振動や騒音が大きいという欠点がある.

一方, PM モータは他のモータと比べて, トルク密度や効率が低い. ただし, インホイールモータに適用するためには, アウターロータ構造にする必要があるが, 回転子の形状自由度が低いいため, PM モータは表面磁石型とせざるを得ない. そのため, 弱め界磁制御が効き難く, EV に要求される幅広い速度 - トルク特性を実現することは難しい.

上述の問題を解決するため, 筆者らはフラックスリバーサル (FR) モータに着目している. Fig. 1 は, 1997 年に英国グラスゴー大学の Miller 氏らの研究グループにより, 初めて提案された単相の FR モータである¹⁾. この図からわかるように, 永久磁石が固定子側に配置されていることから, FR モータは二重突極 PM モータ²⁾に分類される. ただし, 一般的な二重突極 PM モータは固定子ヨークに永久磁石が配置されるため, 巻線鎖交磁束の変化はユニポーラとなる一方で, FR モータは同図のように, 固定子極先端に永久磁石が配置されるため, 巻線鎖交磁束の変化はバイポーラになる. これにより, FR モ

ータは一般的な PM モータと同等の出力が期待される. また, 回転子は SR モータと同様に, 突極形の鉄心のみで構成され, 磁石や導体が不要であることから, 形状自由度が低いアウターロータ構造にも適する.

Table 1 に, 以上述べた 3 種類のモータについて, インホイールモータへの適用という観点でまとめた星取表を示す. この表を見ると, FR モータが最もインホイールモータに適した特長を有していることがわかる. 他方で, FR モータに関する研究報告は少なく, 未だ不明なことが多い.

そこで本論文では, 有限要素法 (FEM) を用いて FR モータの最適な回転子極幅に関して検討を行ったので報告する.

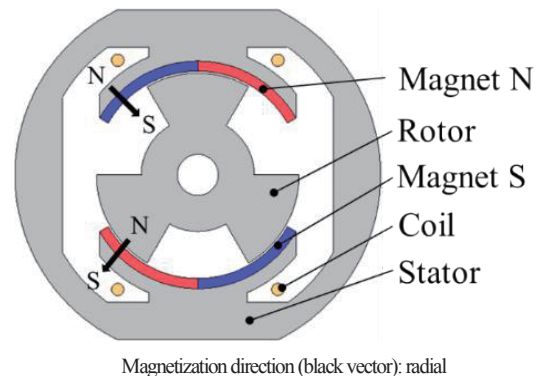


Fig. 1 Single-phase flux reversal (FR) motor proposed in Ref. 1).

Table 1 Evaluations in terms of application to in-wheel motors.

	SR motor	PM motor	FR motor
Torque density	△	○	○
Efficiency	△	○	○
Silence	×	○	○
Speed range	○	△	○
Cost	○	△	△
Robustness	○	△	○

Corresponding author: S. Tsunoda (e-mail: tsunoda.shotaro.p6@dc.tohoku.ac.jp).

2. FR モータの特徴

前章で述べたとおり，FR モータは二重突極機である．Fig. 2 に，SR モータなどの他の二重突極機との基本構造，並びに動作領域の比較を示す．同図(a)の SR モータは起磁力（MMF）も磁束もユニポーラであるため，動作領域は第 1 象限内に限られる．同図(b)の二重突極 PM モータは，起磁力はバイポーラであるが，磁束がユニポーラであるため，動作領域は第 1 象限と第 2 象限に収まる．これらに対して，同図(c)の FR モータは起磁力も磁束もバイポーラであるため，一般的な PM モータと同様に，動作領域が 4 象限すべてに広がる．ここで同図中の破線で囲まれる面積が磁気随伴エネルギー W' に相当し，モータのトルク T は次式で与えられることから，

$$T = \frac{\partial w'(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

すべての象限を利用できる FR モータのトルクは本質的に大きいことが了解される．

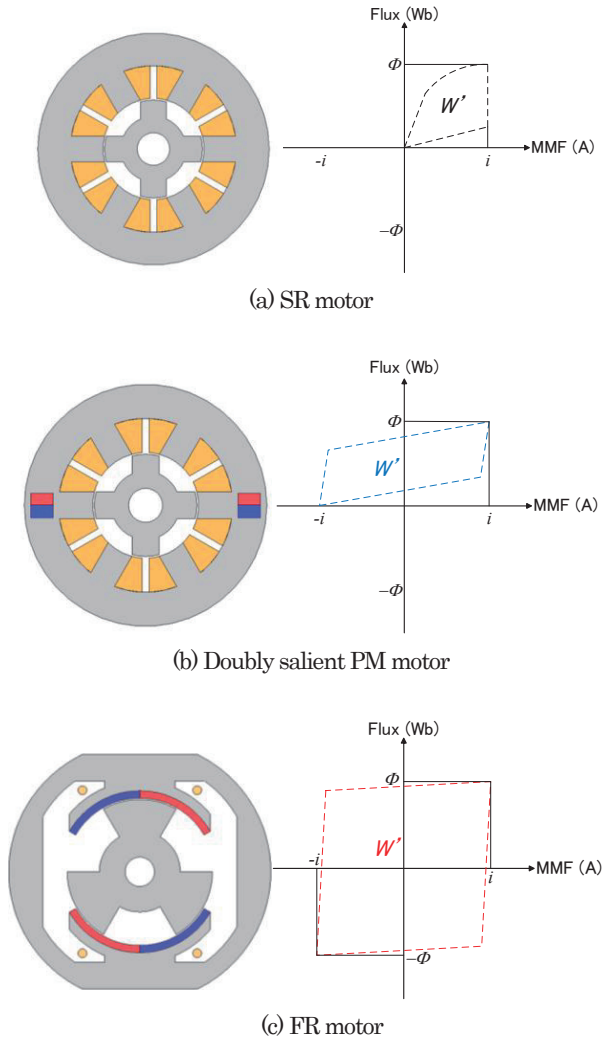


Fig. 2 Comparison of flux-MMF diagrams of SR motor, doubly salient PM motor, and FR motor.

3. FR モータの最適な回転子極幅に関する検討

3.1 FR モータの構造に関する制約条件

Fig. 3 に，考察に用いたアウターロータ型 FR モータの諸元を示す．固定子 18 極，回転子 24 極の 3 相機である．モータの直径と積み厚は，現有の小型 EV に搭載されているアウターロータ型インホイール SR モータ³⁾と同一とした．また，その他の寸法や巻線仕様は，先行研究 4) の FR モータを参考に決定した．鉄心材料は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板であり，磁石材料はネオジム焼結磁石である．

先行研究 5) では，FR モータの固定子や回転子の極幅，スロット幅などが細かく決められている．これは，永久磁石が固定子側に配置され，それ自体が回転しないことから，磁気回路の回転対称性が崩れやすく，誘起電圧に偶数次の高調波成分が含まれる恐れがあるためである．磁気回路が非対称になると，コギングトルクが大きくなったり，モータに不要な振動や騒音が生じる⁶⁾．また，モータ巻線が並列に結線されていると，偶数次の高調波電流が環流し，銅損やトルクリプルの増大につながる⁷⁾．

Fig. 4 に，FR モータの固定子極幅 $2\alpha_m$ およびスロット幅の制約条件を示す．先行研究 5) では，固定子極幅 $2\alpha_m$ が満たすべき制約条件が次式で与えられている．

$$2\alpha_m \times N_r = 360^\circ \quad (2)$$

ここで， N_r は回転子の極数である．Fig. 3 の FR モータでは $N_r = 24$ であることから，固定子極幅 $2\alpha_m$ は 15° となり，スロット幅は 5° となる．

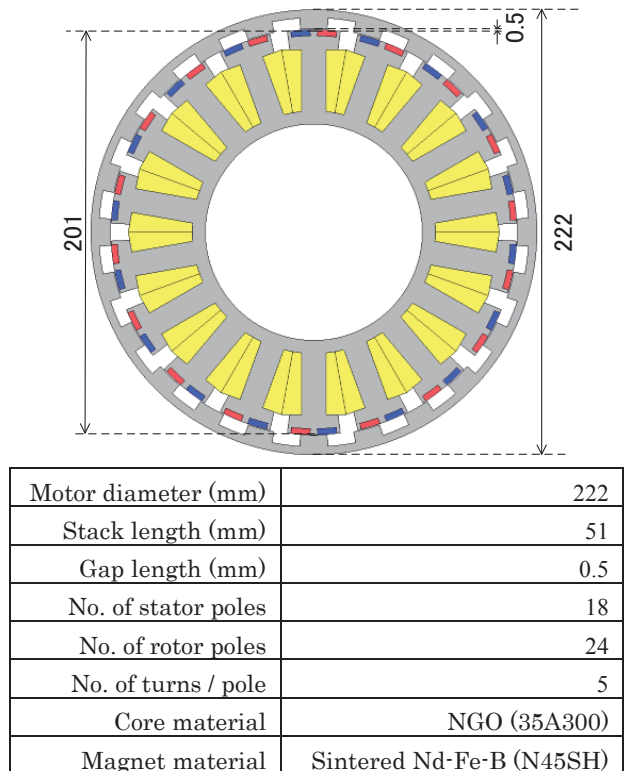


Fig. 3 Specifications of FR motor for compact EV.

なお、先行研究 4)では、Fig. 4 に示すように、固定子極の形状を十字形にすることで、モータ主磁束が磁石に直接流入することを防ぎ、磁石渦電流損を大幅に低減できることが明らかにされている。したがって、本論文でもクロスポール形を採用し、その幅を $CP=2^\circ$ とした。

次いで、Fig. 5 に磁石配置に関する制約条件を示す。この図に示すように、磁石は固定子極を通る中心線と固定子極端部の中央に配置する。

最後に、Fig. 6 には回転子極幅に対する制約を示す。先行研究 5)では、同図に示すように回転子極と凹部を同じ幅にすることが提案されている。したがって、Fig. 3 の FR モータでは回転子極幅は $\alpha_m=7.5^\circ$ となる。

以上述べたように、先行研究 5)に基づく FR モータは構造に関する制約が多く、特に周方向に関する設計の自由度が極めて低い。一方で、本論文で考察対象とするクロスポール形の FR モータに同様の制約条件が当てはまるかについては、まったく不明である。そこで次節では、回転子極幅に着目して、トルク、無負荷誘起電圧、コギングトルク、トルクリプルの観点から最適な回転子極幅について考察を行う。

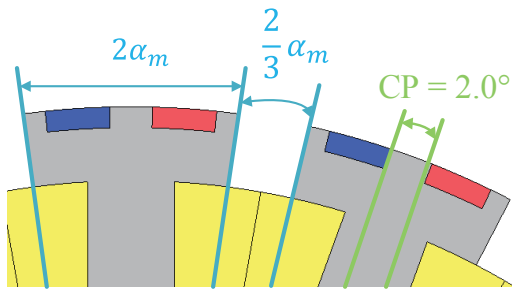


Fig. 4 Constraints on stator pole width and slot width of FR motor.

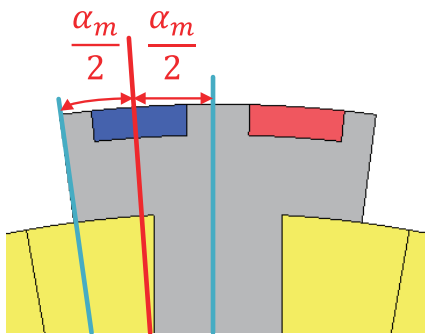


Fig. 5 Constraint on magnet placement of FR motor.

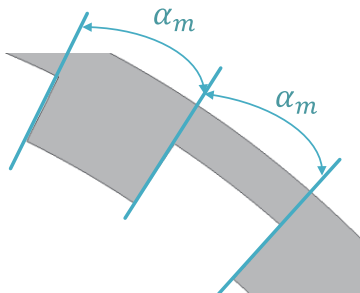


Fig. 6 Constraint on rotor pole width of FR motor.

3.2 クロスポール形 FR モータの最適な回転子極幅に関する検討

本節では、クロスポール形 FR モータの最適な回転子極幅について種々検討を行う。具体的には、2次元有限要素法 (2D-FEM) を用いて、回転子極幅を種々変えてトルク、無負荷誘起電圧、コギングトルク、トルクリプルを算定し、比較検討を行う。

Fig. 7 に、回転子極幅 θ_{rp} と回転子極ピッチ θ_{rpp} を示す。以降の考察では、回転子極幅 θ_{rp} と回転子極ピッチ θ_{rpp} の比 γ を、回転子極幅比と定義する。

$$\gamma = \frac{\theta_{rp}}{\theta_{rpp}} \quad (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (3)$$

よって、 $\gamma = 0.5$ が先行研究 5)で推奨されている回転子極幅となる。

Fig. 8 に、FR モータの 2D-FEM モデルを示す。本モデルの要素数は約 129,000 である。コギングトルクについても詳細に検討するため、一般的な FEM モデルよりも要素数を増やしている。なお、FEM には(株)JSOL 製の電磁界解析プログラム JMAG Designer 23.1 を用いた。

Fig. 9 に、回転子極幅比に対するトルクを示す。このときの電流位相角 β は 0° である。この図を見ると、先行研究 5)で推奨されている回転子極幅比 0.5 はトルク最大の観点からは最適では無いことがわかる。同図に示すように、極幅比を 0.3 にすることでトルクは約 17%向上した。

Fig. 10 に、回転子極幅比 0.5 と 0.3 の場合の磁束線図を示す。まず同図(a)の回転子極幅比 0.5 のときの磁束線図を見ると、回転子極が固定子スロット幅よりも広いいため、ある固定子極の磁束が回転子極を介して隣接する固定子極に漏れる、いわゆる

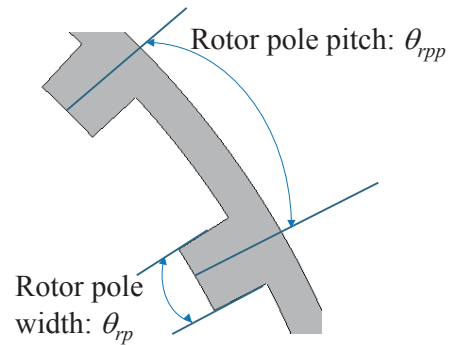


Fig. 7 Rotor pole width and rotor pole pitch.

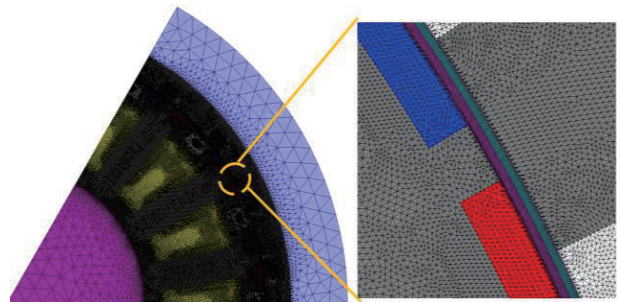


Fig. 8 2D-FEM model of FR motor.

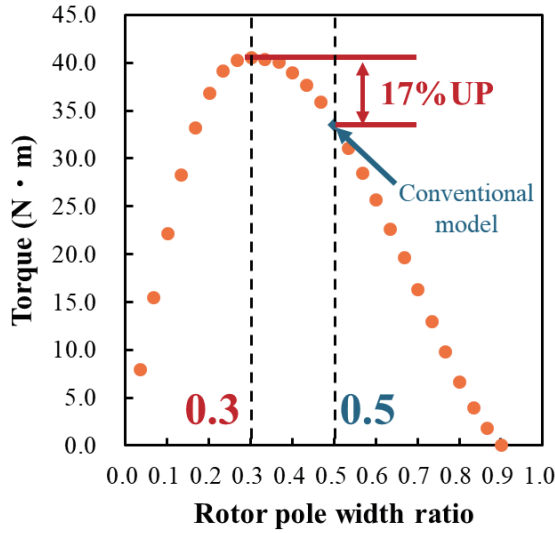


Fig. 9 Relationship between rotor pole width ratio and torque.

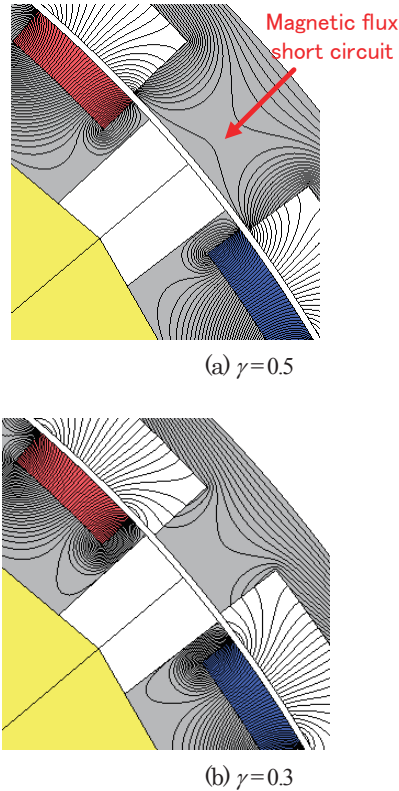


Fig. 10 Comparison of flux line diagrams.

る磁束の短絡が起きていることがわかる。一方、同図(b)の 0.3 のときは、ちょうど回転子極幅とスロット幅が等しく、磁束の短絡が生じていない。これがトルクを向上させた理由であると考えられる。なお、0.3 よりも小さくなると、回転子極幅がさらに細くなって磁気飽和が生じるため、鎖交磁束が減ってトルクが減少する。

次いで、無負荷誘起電圧について検討する。Fig. 11 に、回転子極幅比 0.5 と 0.3 の場合の無負荷誘起電圧の計算波形を示す。この図を見ると、各々高調波は含まれているが、極幅比

0.3 であっても半波対称性が保たれている、すなわち偶数次の高調波成分は十分小さいことがわかる。

Fig. 12 には、Fig. 11 に示した電圧波形の FFT の結果を示す。まず基本波成分を見ると、極幅比 0.3 の方が約 6.7%大きいことがわかる。したがって、極幅比 0.3 にしてトルクが向上したのは、磁束の短絡が解消されてトルクに寄与する基本波成分が増大したことが要因の一つと結論付けることができる。一方、高調波成分はいずれの極幅比でも小さいことが了解される。

Fig. 13 に、回転子極幅比に対する偶数次の高調波歪みを示す。なお、偶数次の高調波歪みは次式を用いて第 10 次まで含めて評価した。

$$D_{\text{even}} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_4^2 + \dots + V_{10}^2}}{V_1} \times 100 (\%) \quad (4)$$

先行研究 5)では、偶数次の高調波成分を抑制するために、回転子極と凹部を同じ幅にすることが提案されているが、少なくとも本論文で考察対象としたクロスポール形 FR モータには当てはまらず、比率 0.5 よりも 0.3 の方が小さいことがわかる。また、0.23 で最小となることが了解される。これは、固定子極の形状が十字形になったことで、パーミアンスの空間分布に変化が生じたことが大きな要因の一つであると考えられる。

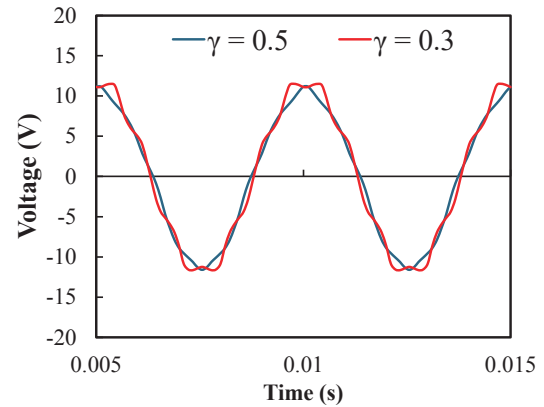


Fig. 11 Comparison of calculated no-load induced voltage waveforms at different rotor pole width ratios.

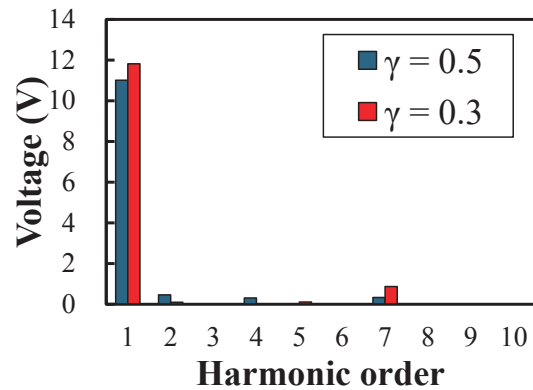


Fig. 12 Harmonic order components of no-load induced voltages shown in Fig. 11.

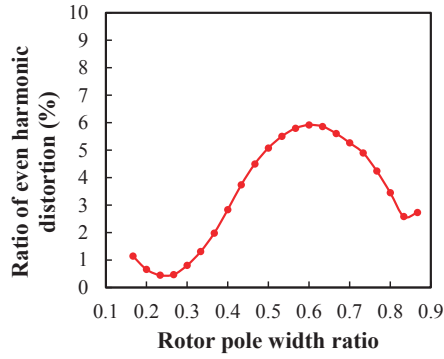


Fig. 13 Relationship between rotor pole width ratio and even harmonic distortion of no-load induced voltage.

最後に、コギングトルクとトルクリプルについて検討する。Fig. 14 に、回転子極幅比 0.5 と 0.3 の場合のコギングトルクの計算波形を示す。この図を見ると、コギングトルクについては、両者にほとんど差が無いことがわかる。

一方、Fig. 15 にトルクリプルの比較を示す。このときの電流密度は 8.2 A/mm^2 であり、電流位相角 β は 0° である。同図より、トルクリプルについては極幅比 0.3 の方が小さいことが了解される。具体的には、極幅比 0.5 がリプル率約 66% であるのに対して、比率 0.3 は約 29% であり、半分以下まで低減した。極幅比 0.5 のリプルが大きくなった理由は、Fig. 16 からわかるように、磁気飽和が生じたためであると考えられる。したがって、トルクリプルの観点から見て、回転子極幅比は 0.3 が適切であることが明らかとなった。

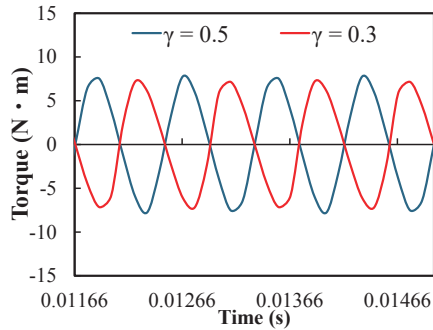


Fig. 14 Comparison of cogging torque waveforms with different rotor pole width ratios.

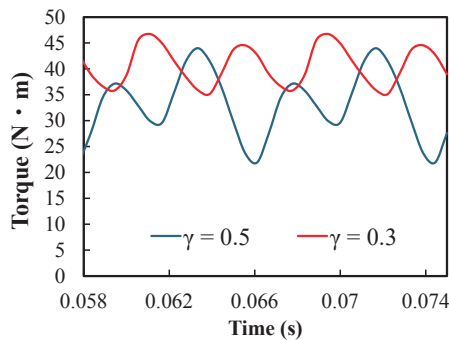


Fig. 15 Comparison of torque waveforms at 8.2 A/mm^2 with different rotor pole width ratios.

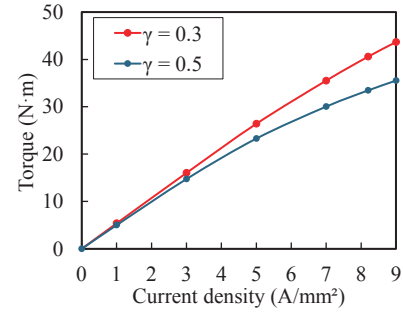


Fig. 16 Comparison of current density versus torque characteristics.

4. まとめ

以上、本論文ではフラックスリバーサル (FR) モータの最適な回転子極幅について、トルク、無負荷誘起電圧、コギングトルク、トルクリプルの観点から種々考察を行った。

まずトルクに関しては、先行研究で推奨されている回転子極幅比 0.5 では無く、極幅比 0.3 にすることで約 17% 向上することを明らかにした。これは、極幅を適切に狭くすることで隣接固定子極間の磁束の短絡が解消され、トルクに寄与する磁束の基本波成分が増大したことが要因の一つである。

次いで、無負荷誘起電圧に関しては、偶数次の高調波成分を抑制するために、先行研究では回転子極幅比 0.5 が推奨されている。しかし、少なくとも本論文で考察対象としたクロスポール形 FR モータには当てはまらず、極幅比 0.3 の方が小さいことが明らかとなった。

最後にトルクリプルに関しても、回転子極幅比 0.3 の方が、従来の 0.5 よりも低減されることが明らかとなった。

以上の検討から、本論文のクロスポール形 FR モータに関しては、トルク、無負荷誘起電圧、コギングトルク、トルクリプルのすべての観点から見て、最適な回転子極幅比は 0.3 であると結論付けることができた。

今後は、固定子側の制約条件についても詳細な検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は東北大学人工知能エレクトロニクス卓越大学院プログラムの支援を得て行われたものである。

References

- 1) R. P. Deodhar, S. Andersson, I. Boldea, and T. J. E. Miller: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **33**, 925 (1997).
- 2) Y. Liao, F. Liang, and T. A. Lipo: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **31**, 1069 (1995).
- 3) N. Tashiro and K. Nakamura: *IEEE J. Ind. Appl.*, **10**, 708 (2021).
- 4) Y. Yu and K. Nakamura: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 97 (2023) (in Japanese).
- 5) I. Boldea and L. Tutelea: *Reluctance Electric Machines: Design and Control*, p. 301 (CRC Press, 2018).
- 6) R. Takahata, S. Wakui, K. Miyata, K. Noma, and M. Senoo: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **138**, 730 (2018) (in Japanese).
- 7) M. Arata, M. Mochizuki, T. Araki, T. Hanai, and M. Matsubara: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **133**, 995 (2013) (in Japanese).

2024年 10月 20日受理, 2025年 2月 14日採録