

マルチギャップ形可変界磁 PM モータの 磁極相対角に対する駆動特性の実機検証

青山 真大*, 中島 一清 (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Experimental Study on Driving Performance with Respect to Relative Angle of Magnetic Pole of Multi-Gap-Type Variable Magnetic Flux PM Motor

Masahiro Aoyama*, Kazukiyo Nakajima (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper presents a variable magnetic flux PM motor in which space harmonic power is utilized for flux linkage control, automatically. The stator has a toroidally-concentrated winding structure, and the torque generation surfaces are composed of three air-gaps, i.e., a single radial-gap and double axial-gaps. The radial-gap rotor is a consist-magnetized PM rotor and the axial-gap rotors are self-excited wound-field rotor. The driving performance with respect to relative angle between the radial-gap rotor and the axial-gap rotors are experimentally demonstrated.

キーワード：可変界磁，空間高調波，トロイダル巻，自己励磁，マルチギャップ，磁極相対角
(variable magnetic flux, space harmonics, toroidal winding, self-excitation, multi-gap, relative angle of magnetic pole)

1. はじめに

近年，輸送機器分野における CO₂ 排出量削減の取り組みとして，自動車の電動化が急激に促進されている。近年の電動化の流れとしてハイブリッド (HEV) について述べると①12 V~48 V システム，②100 V 前後の低電圧システム，③200 V~300 V に昇圧機能を組み合わせたストロング HEV システムに大きく分類される。車両重量が軽量な B セグメント以下のコンパクトカーにとってコスト，HEV パワートレインの重量，燃費改善効果のバランスを考えると①もしくは②の HEV システムが最も適している。さらに①の場合，60 V よりも低い電圧のため，安全対策 (感電対策処置) の観点からアジア諸国も含めて普及させやすいメリットがある。しかし，高電圧 HEV システムに比べて限られた電圧制限内で駆動する必要があるため，従来の永久磁石形同期モータ (IPMSM) を用いた場合は著しく駆動領域が狭まってしまう問題がある。今日の一般的な低電圧 HEV システムとして，スリップリングを介して界磁調整可能なクローポール形オルタネータとインバータを組み合わせたシステムや，誘導電動機 (IM) を用いたシステムが検討されている。しかし，前者の場合，大出力化に伴い従来よりも界磁電流を増やす必要がありブラシの摩耗や耐久性が問題となる。さらに鉄塊のロータ構造のため，鉄損増加により高効率小型化が困難である。IM に関してはロータに界磁源を有しておらず，且つ誘導性のため効率と力率が低いという問題が

ある。

それらの課題に鑑みて，近年，磁石式同期モータ (PMSM) の高効率エリアと出力拡大を目的に可変界磁モータの検討が盛んに行われている⁽²⁾⁻⁽¹⁵⁾。特にトルク密度の増加と可変界磁を両立する方法としてマルチギャップ構造を採用し，界磁巻線を用いて直流磁界を重畳させることでイメージポールの磁気抵抗を調整して可変界磁する手法や，バイパス磁路を形成して電機子鎖交磁束を調整する手法が報告されている⁽⁸⁾⁻⁽¹³⁾。しかし，これらの先行技術は界磁磁束を制御するチョッパ回路を追加する必要や，バイパス磁路での鉄損による効率低下など依然として解決すべき課題もある。一方，筆者らは新たなマルチギャップ構造の可変界磁技術として，チョッパ回路の追加やバイパス磁路等を不要とし，回転速度の増加とともに自動的に永久磁石磁束に対して極性反転 (磁極相対角 180 deg) した電磁石磁束 $\Psi_{e-coil}(\omega)$ を形

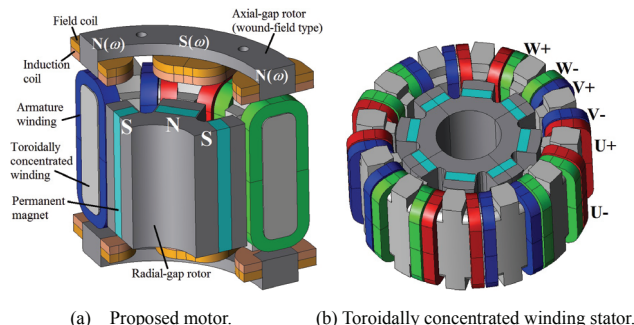


Fig. 1. Proposed variable magnetic flux PM motor.

Table I. Specifications of prototype.

Number of rotor poles	8
Number of stator slots	12
Motor core outer diameter	120 mm
Air-gap length	Radial 0.7 mm Axial 0.9 mm
Axial length of core	51.8 mm (without axial-gap core) 107.6 mm (with axial-gap core)
Maximum magnetomotiveforce	900 A _{rms} T (30 s)
Number of stator coil-turn	9
Armature winding connection	4 series
Number of rotor induction coil-turn	30
Number of rotor field coil-turn	30
ature coil size (with insulation coating)	5.26 mm×0.56 mm
Rotor coil size (with insulation coating)	2.57 mm×0.47 mm
Core material	SMC (stator and axial rotor) Magnetic steel sheet (radial rotor)

成することでパッシブに可変界磁を実現する PM モータを既に提案し、その駆動特性を実機検証してきた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

本稿では上記のモータを対象に、ラジアルギャップに内包する PM ロータとアキシャルギャップ両面に配置した巻線界磁 (WF) ロータ間の磁極相対角 (RA : Relative Angle) を変更したときの駆動特性と可変界磁効果への影響について実機試験を通して明らかにしたので報告する。

2. 小型試作機の構造と主要諸元

Fig. 1 に提案モータの全体構造(一例として RA = 180 deg)を示す。集中巻トロイダルステータのラジアルギャップ面に PM ロータ, アキシャルギャップ二面に自励式巻線界磁ロータ (SE-WF ロータ) を配置している。PM ロータの磁極は固定界磁の永久磁石のため起磁力が一定であるが, SE-WF ロータの磁極は集中巻構造で不可避に発生する第 2 次空間高調波 (基本波に対して逆相のため, 基本波回転座標上では第 3 次時間高調波) を界磁エネルギー源としてダイオード整流回路により自励するパッシブな可変界磁磁極 (回転速度や電機子起磁力により界磁量が変化) となる⁽¹⁸⁾。Fig. 2 に試作した小型試作機を示し, Table I に主要諸元を示す。ラジアルギャップ面の PM ロータとアキシャルギャップ二面の SE-WF ロータ間の磁極相対角 (RA) は Fig. 3(a) に示すように同磁性 (強め界磁) の位置を RA = 0 deg (電気角) とし, 極性反転 (弱め界磁) の位置を RA = 180 deg (電気角) と定義している。Fig. 3(b) に示すようにレゾルバ側の SE-WF ロータはシャフトに対して圧入し, 出力軸側の SE-WF ロータは隙間嵌めになっている。PM ロータも隙間嵌めとし, PM ロータと SE-WF ロータの RA を変更して組み替え可能な構造設計としている。ロータの締結はシャフトにタップを切り, ロックナットで締め付けている。RA の変更は PM ロータのキー位置を変更したロータコアを試作して対応し, 組み付けると Fig. 4 に示すようになる。電気角で 0 deg から 180 deg まで 30 deg 刻みで RA を変更させて実機検

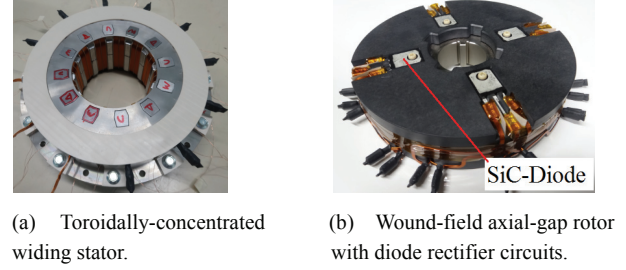


Fig. 2. Prototype.

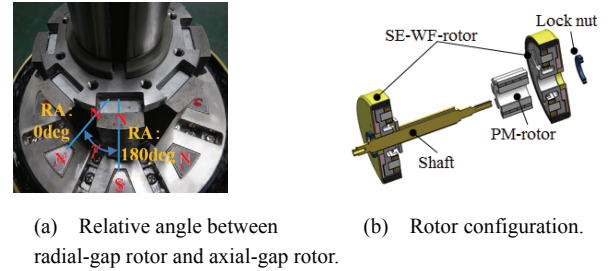


Fig. 3. Relative position between radial-gap rotor and axial-gap rotor.

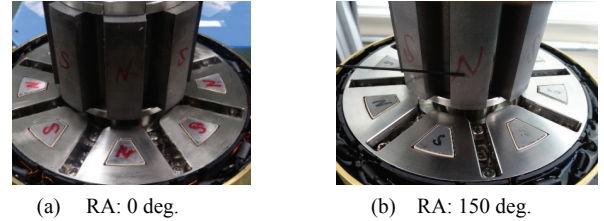


Fig. 4. Relative angle between radial-gap rotor and axial-gap rotor.

証する。

3. 実機による運転特性の検証

〈3・1〉 電流位相-トルク特性

汎用インバータ (Myway プラス製) を用いてキャリア周波数 10 kHz とし, トルク測定はモータベンチ側で速度制御, 供試モータ駆動用インバータでトルク制御を行った。測定温度条件は, ステータコイルエンドに取り付けた熱電対で検出した温度が常温から 90 °C 以内となる範囲とした。磁極位置は PM ロータの N 極が U 相電機子巻線方向を向く位置で調整している。その結果, RA が 0 deg と 180 deg 以外の場合は SE-WF ロータの突極位置が d 軸上からずれた位置に存在することになる。すなわち, Fig. 5(a) に示すように RA が 0 deg (PM ロータ N 極に対して SE-WF ロータも N 極の同極性) のときを基準として, 180 deg (PM ロータ N 極に対して SE-WF ロータ S 極の極性反転) に向かう方向の磁極相対角を γ とおくと, トルク T は以下で表すことができる。

$$\frac{T}{P_p} = (L_d - L_q)(-I_a \sin(\beta - \gamma))I_a \cos(\beta - \gamma) + \psi_{mag}I_a \cos \beta - \psi_{e-coil}I_a \cos \beta \quad (1)$$

ここで, P_p は極対数, L_d と L_q は d 軸, q 軸インダクタンス, I_a は電機子電流, β は電流位相 (+ q 軸を基準), ψ_{mag} は磁石磁束, ψ_{e-coil} は電磁石磁束である。右辺第一項はリラクタンストルク, 第二項は磁石トルク, 第三項は電磁石トルク

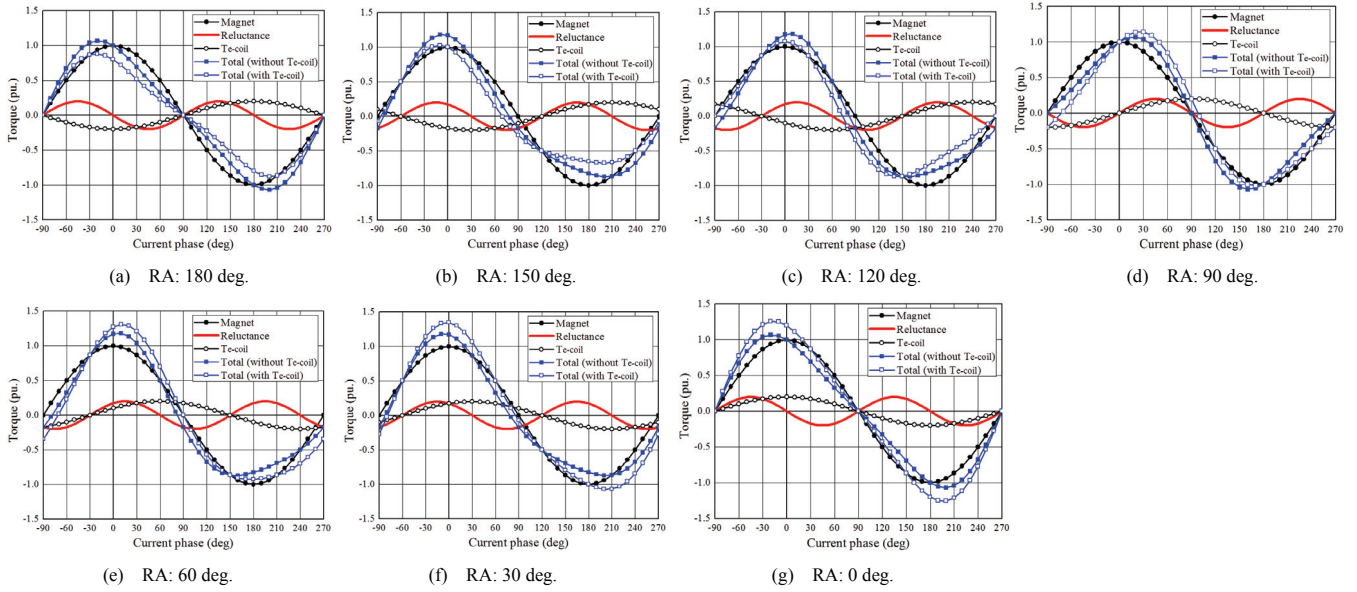


Fig. 5. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to relative angle between PM-rotor and SE-WF rotor (Calculated by Eq. (1)).

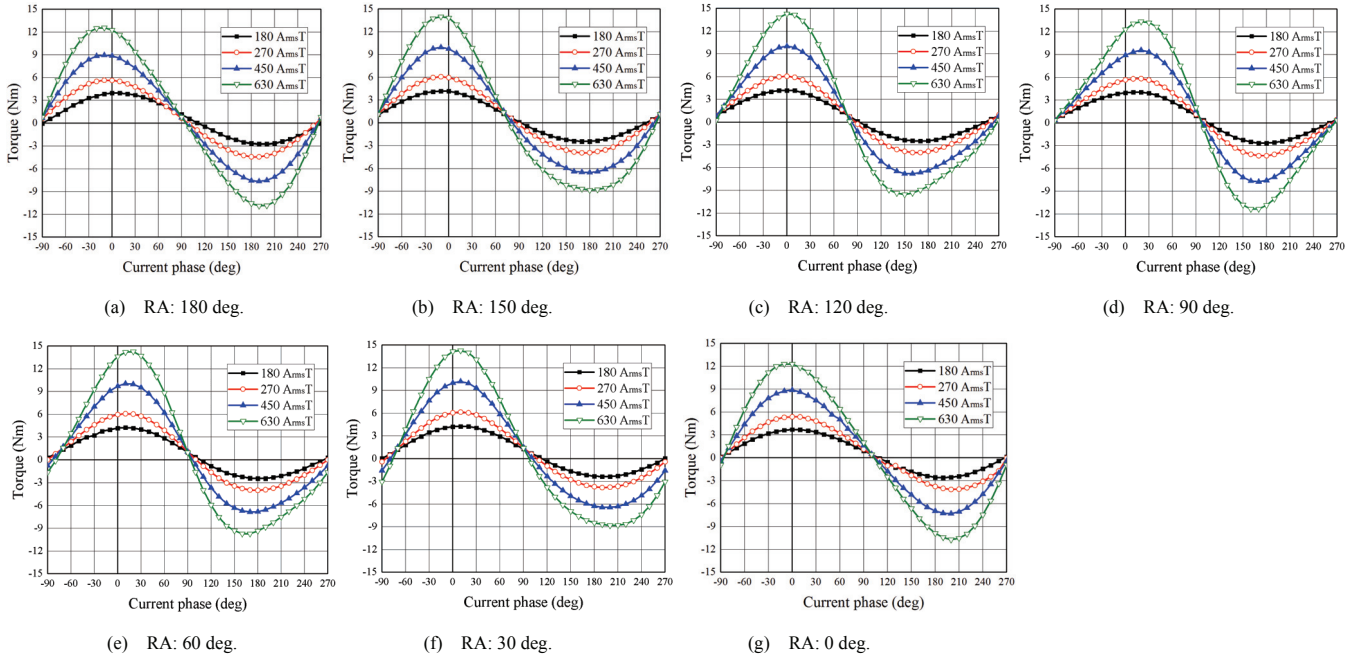


Fig. 6. Current phase-vs.-torque characteristics for 500 r/min (Measured).

を表している。磁極相対角 γ は磁石トルクとリラクタンストルクが逆相関係にならないように、 $0 \leq \gamma(\text{deg}) \leq 90$ の範囲で変化させる。RAが90 degから180 degの範囲は極性反転になるようにSE-WFロータ巻線の整流回路を結線し、RAが0 degから60 degの範囲は同極性になるようにSE-WFロータ巻線を結線する。(1)をもとに机上計算した結果をFig. 5に示す。前提条件として電磁石磁束はRA及び、電流位相に対して不変(すなわち、第2次空間高調波分布が電流位相角によって変化せず界磁電流が常に一定)という近似条件で机上計算している。Fig. 5からわかるように、RAを変化させることでリラクタンストルクと磁石トルクの位相差が変化し、理論的にはRAが45 degのときに両トルクの位相が一致して最大トルクとなる。Fig. 6に500 r/minにおいて

磁極相対角を変化させたときの電流位相 - トルク特性の実測値を示す。500 r/minの極低回転かつ、電機子起磁力630 ArmsTの駆動条件下ではSE-WFロータのI-coilにおける誘導起電力が小さく、ロータ巻線ジュール損で消費されて自励しないため、Fig. 5のTotal (without $T_{e\text{-coil}}$)の机上計算結果と比較できる。Fig. 5とFig. 6を比較すると傾向としては近いことが確認できる。一方で理論的にはRAが90 degのとき、 $\sin 2(\beta - \gamma)$ 関数のリラクタンストルクはRAが180 degと0 degの場合に対して逆相となり、 $\cos \beta$ 関数の磁石トルクと合算した総合トルクのピーク値が一致するはずだが、一致せずに総合トルクが増加する傾向になっている。ラジアルギャップ面でトルクを発生するPMロータの磁石磁束がアキシアルギャップ面のSE-WFロータ側にも磁路が形成する

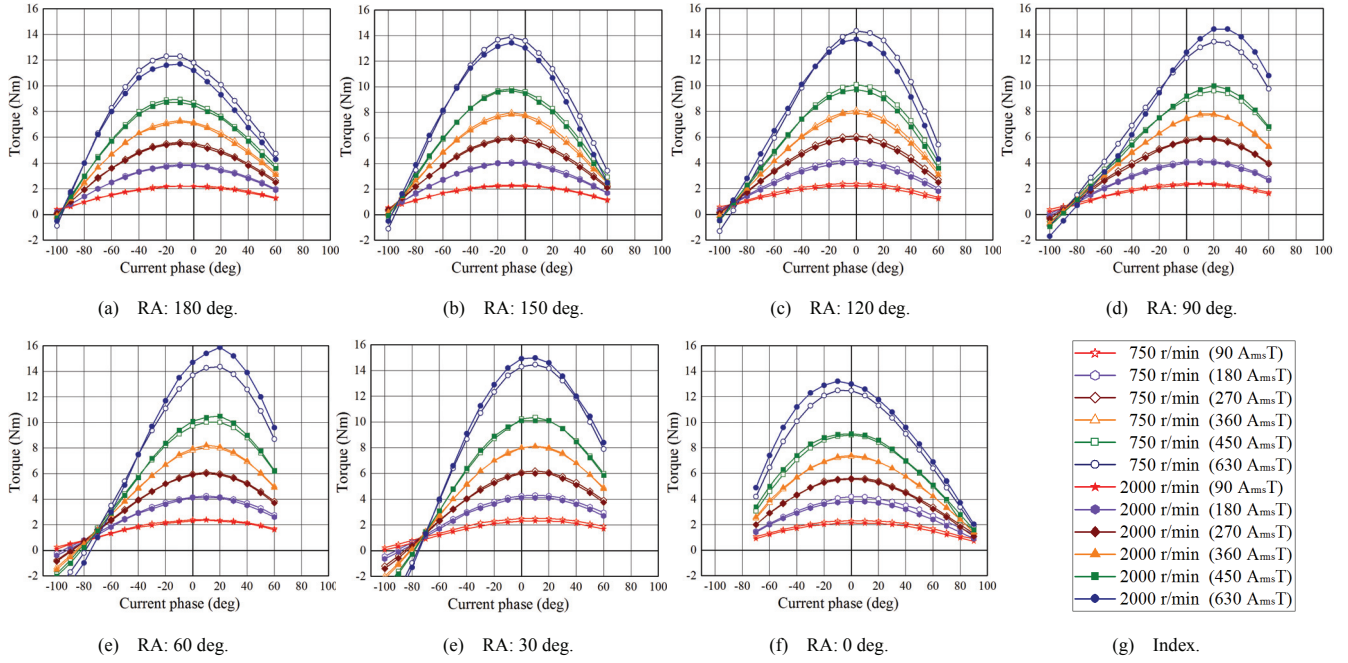


Fig. 7. Adjustable speed drive characteristics with respect to current phase.

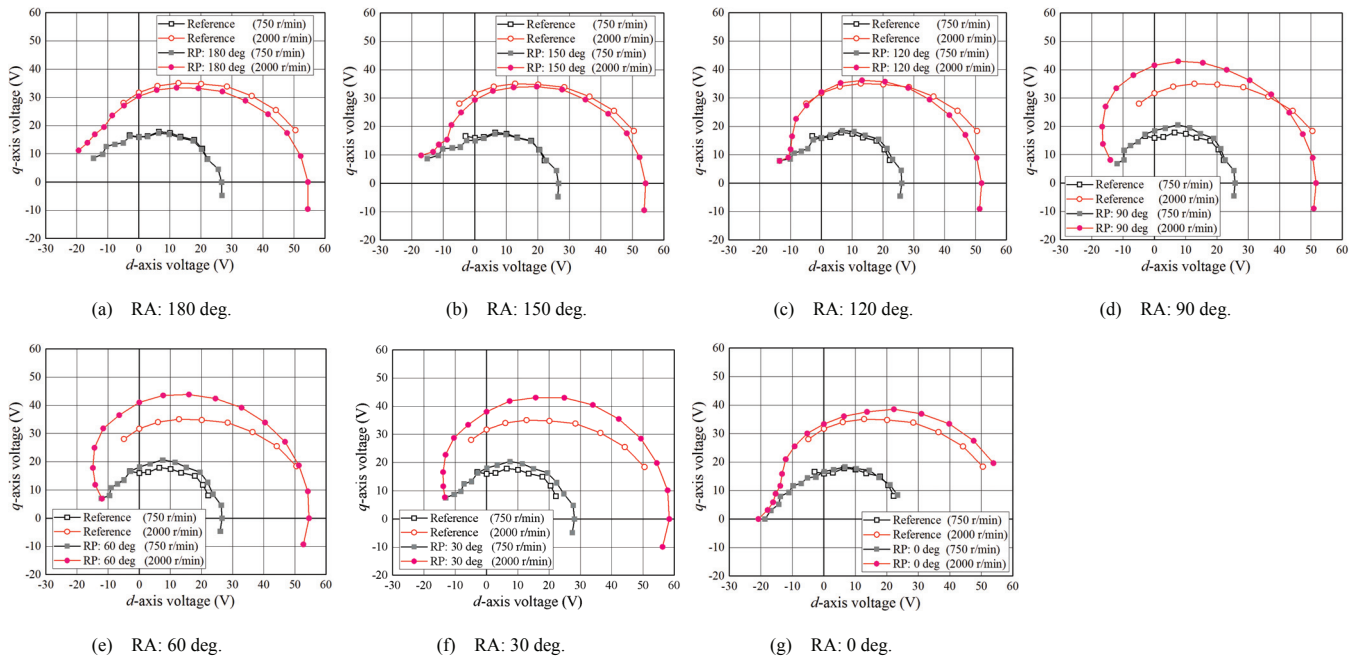


Fig. 8. dq -axis voltage ellipse with respect to relative angle between PM-rotor and SE-WF rotor under $630 A_{rms} T$.

ことで磁石トルクとリラクタンストルクの位相関係において理論との差が生じていると考えられるが詳細な分析は未検討である。

次に Fig. 7 に回転速度 750 r/min と 2000 r/min にて、電機子起磁力を $180 A_{rms} T$, $270 A_{rms} T$, $360 A_{rms} T$, $450 A_{rms} T$, $630 A_{rms} T$ と変化させたときの電流位相-トルク特性を示す。提案モータの自動的な弱め界磁機能を確認するため、直流バス電圧は駆動速度範囲内において十分高い値の規定回転速度以下で測定を行った。同図より、回転速度の変化に応じて強め界磁もしくは弱め界磁されていることが確認できる。磁極相対角が極性反転する RA の範囲 ($90 \text{ deg} < RA \leq$

180 deg) よりも同極性になる RA の範囲 ($0 \text{ deg} < RA \leq 90 \text{ deg}$) のほうがトルクの変化幅が大きいことが確認できる。提案モータの変界磁エネルギー源は集中巻ステータ構造で不可避に発生する第 2 次空間高調波のため、極性反転する弱め界磁の RA の範囲では自身で可変界磁エネルギー源を低減させることになる。一方、同極性になる強め界磁の RA の範囲では自身で界磁エネルギー源を増加させることになるため、その効果がトルク特性に現れていると考えられる。

〈3・2〉 dq 軸電圧楕円

次に、RA に対する可変界磁効果について線間電圧を比較す

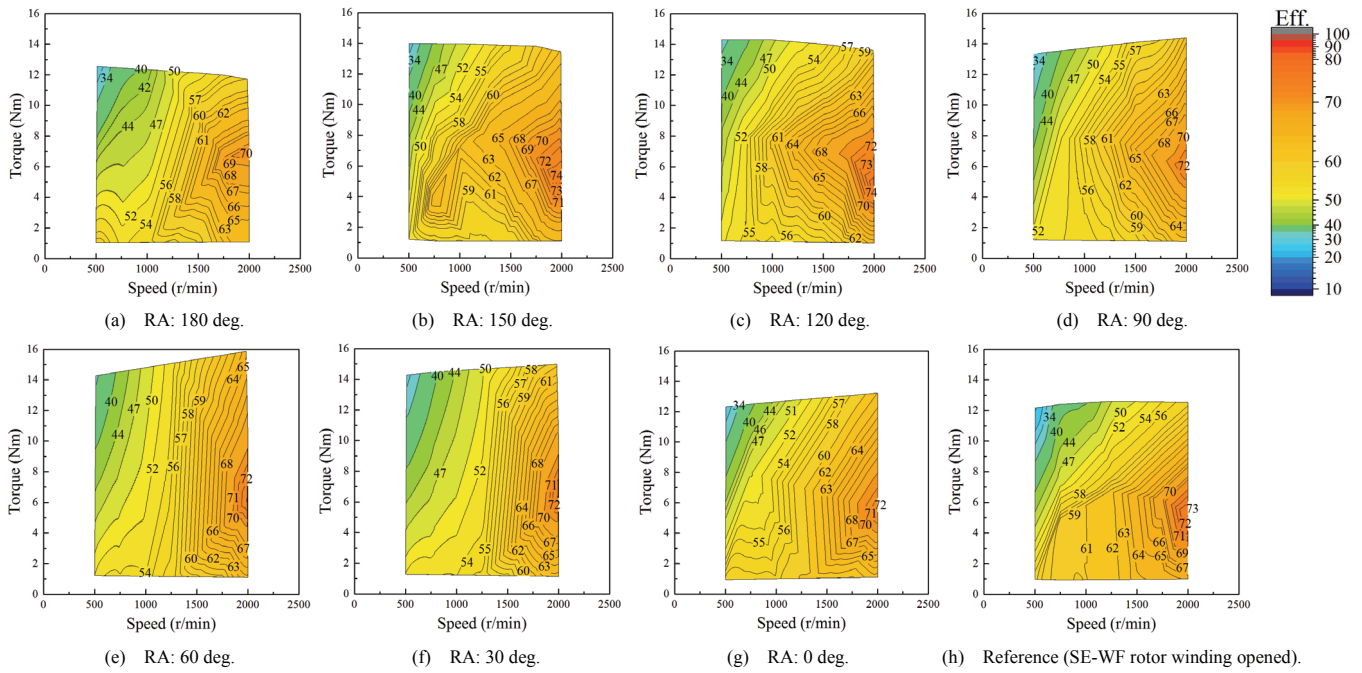


Fig. 9. Efficiency map in motoring.

ることで実験的に明らかにする。Fig. 8 に各 RA の状態において、測定した線間電圧を電流位相指令値をもとに dq 軸電圧に換算してプロットした結果を示す。同図において、Reference は SE-WF ロータ巻線を開放にして測定した結果である。同図より磁極相対角を変化させることで dq 軸電圧楕円が大きく変化することがわかるが、強め界磁になる RA の範囲 ($0 \text{ deg} < \text{RA} \leq 90 \text{ deg}$) では dq 軸電圧楕円の増加、弱め界磁になる RA の範囲 ($90 \text{ deg} < \text{RA} \leq 180 \text{ deg}$) では dq 軸電圧楕円の減少の理論通りの結果を確認できる。

〈3・3〉 効率特性

Fig. 9 に各 RA における効率マップ（力行駆動）を示す。低負荷時は Reference モデルが最も効率が良い結果となった。鉄損が支配的となるが回転速度が 2000 r/min と低いため、界磁磁束（磁石磁束もしくは電磁石磁束）による鉄損が主要因だと推察できる。低負荷域では電機子起磁力が低く可変界磁エネルギー源となる第 2 次空間高調波の振幅も低いため、ファラデーの法則に従い I-coil に発生する誘導起電力も低い。その結果、SE-WF ロータの I-coil で誘導起電力が発生したとしてもロータ巻線抵抗やダイオード素子の抵抗による損失（ジュール損）で大半は消費されるが、ロータ電流リップルは発生している。このロータ電流リップルに起因した鉄損の影響で Reference モデルよりも効率が低下していると考えられる。

一方、高負荷域において完全な反転磁極が形成される条件 ($\text{RA} : 180 \text{ deg}$) で反転磁極の磁化量が増加するに従い、高効率エリアが縮小していることが確認できる。今回は原理検証機を用いて磁極相対角を変化させたときの駆動特性を明らかにするため、電圧制限を設けていなかった。そのため、反転磁極による弱め界磁効果により効率が減少している。今後、従来の電機子電流位相進角による弱め界磁制

御 ($-i_d$ によるベクトル制御での弱め界磁) と本提案の電氣的反転磁極による自動的な弱め界磁（モータハードによる弱め界磁）で性能比較を行い、提案する可変界磁技術の長所と短所を明らかにする必要がある。

その他の RA の結果について、中負荷域においては強め界磁になる RA の条件 ($\text{RA} : 0, 30, 60, 90 \text{ deg}$) よりも RA が 120 deg や 150 deg の弱め界磁になる RA の条件 ($\text{RA} : 180 \text{ deg}$ を除く) のときのほうが高効率な結果となった。低負荷域と同じで磁石磁束に起因する鉄損が支配的だと予測されるため、SE-WF ロータの反転磁極によってステータに鎖交する磁石磁束が弱められて鉄損が低減したと推察できる。

〈3・4〉 MTPA 点駆動時の性能比較

Fig. 9 に電機子起磁力 630 A_{rms}T、回転速度 2000 r/min 時の MTPA (Max Torque Per Ampere) 点における回転速度ートルク、線間電圧比率特性を示す。MTPA 点における Reference モデルのトルク T_{ref} または線間電圧 V_{ref} に対する各 RA のトルク T_{RA} または線間電圧 V_{RA} の比率 (T_{RA}/T_{ref} , V_{RA}/V_{ref}) である。同図(b)より、MTPA 点においては RA が 60 deg 以上の範囲 ($\text{RA} : 60, 90, 120, 150, 180 \text{ deg}$) で線間電圧を Reference モデルよりも抑制できていることが確認できる。これは Fig. 5 に示すように RA を変化させることでリラクタンストルクと磁石トルクの位相差が変化し、MTPA 点が弱め界磁領域（電流位相が 0 deg よりも進角した領域）になることで線間電圧を抑制できている効果が大きい。RA が 150 deg になると再び線間電圧抑制効果が減少するが、MTPA 点が再び強め界磁領域（電流位相が 0 deg よりも遅角した領域）になるためである。さらに RA が 180 deg になると RA が 150 deg のときよりも線間電圧を抑制できているが、これは SE-WF ロータで形成される反転磁極による弱め界磁効果が大きいと考えられる。Fig. 9 の効率まで考慮してトルク、可変界磁範

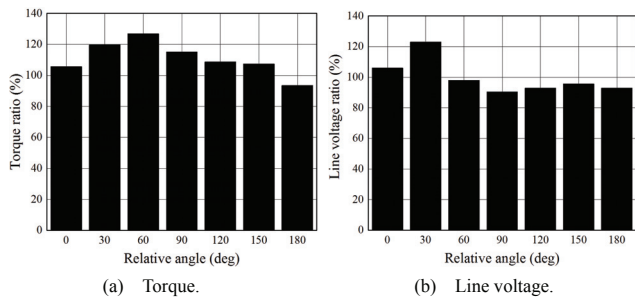


Fig. 10. Torque and line voltage normalized in reference model.

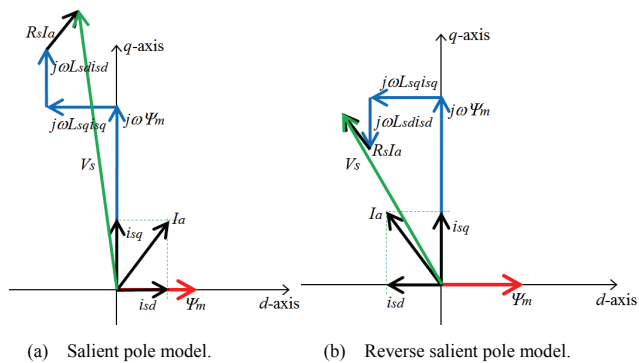


Fig. 11. Basic vector diagram.

囲、効率のバランスがとれた RA は、実機検証した条件下において RA : 90 deg が最適であると言える。

4. まとめ

本稿では、アクチュエータを不要とし、回転速度の増加とともに自動的に電機子鎖交磁束を調整できるマルチギャップ形可変界磁 PM モータについて、固定界磁磁極のラジアルギャップロータと可変界磁磁極のアキシシャルギャップロータの磁極相対角 (RA) を変化させたときの駆動特性を実機検証し、以下の点を明らかにした。

- 1) 磁極相対角を調整することでリラクタンストルクと磁石トルクの位相特性を調整し、トルクの向上が可能。
- 2) 測定した条件の範囲においては磁極相対角が 90 deg のときに MTPA 制御時にトルク、可変界磁範囲、効率の点で最もバランスが良い。
- 3) 可変界磁機能がないモデル (アキシシャルギャップロータ巻線を開放) に対して、可変界磁機能があるモデル (アキシシャルギャップロータ巻線を整流回路結線) にすると低負荷域で効率が悪化する。
- 4) 中負荷域では磁極相対角が弱め界磁になる条件 (RA が 120 deg や 150 deg) のときに高効率となる。

上記の 3)については自励によって得られたロータ電流リップルによる鉄損増加による可能性が考えられ、4)については界磁磁束による鉄損が支配的な駆動点だと予測できるため、可変界磁効果によって界磁磁束が弱められ鉄損を低減できたと考えられる。今回、原理検証のためモータの効率を狙った設計をしていなかったが今後モータ効率向上を狙うためには SMC の加工方法まで考慮した磁気回路設計に加えて、MTPA 駆動時の各起磁力のバランスと電機子電流ベ

トルの動作点をどのように設計するかが重要となる。今後、MTPA 駆動点 (電機子電流ベクトルの動作点) と各起磁力バランスがモータ性能 (トルク、可変界磁範囲、効率) とどのような相関があるのかを考究していく。

文 献

- (1) CPT HP: "European auto industry embracing 48V hybrid", <http://www.epowert.com/European-auto-industry-embracing-48V-hybrids>
- (2) Ostovic, V.: "Memory Motors", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 9, pp.52-61 (2003)
- (3) Ostovic, V.: "Memory Motors – a New Class of Controllable Flux PM Machines for a True Wide Speed Operation", *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference*, 2001, vol. 4, pp.2577-2584 (2001)
- (4) K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, and L. Kovdihiklungsri: "Principle and Basic Characteristics of Variable Magnetic-Force Memory Motors", *IEEJ Trans. on IA*, vol. 131, No. 1 pp.53-60 (2011) (in Japanese)
- (5) T. Kato, N. Limsuwan, C. Y. Yu, K. Akatsu, and R. D. Lorenz: "Rare Earth Reduction Using a Novel Variable Magnetomotive Force, Flux Intensified IPM Machine", *IEEE Trans. on IA*, vol. 50, No. 3, pp.1748-1756 (May/June, 2016)
- (6) T. Nonaka, S. Oga, and M. Ohto: "Consideration about the Drive of Variable Magnetic Flux Motor", *IEEJ Trans. on IA*, vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015) (in Japanese)
- (7) 平本健二・難波雅史・中井英雄・守屋一成・伊藤嘉昭・三浦徹也・山田堅滋: 「回転電機の制御装置及び回転電機制御システム」, 特開(A)2015-177640 (published in 2014) (in Japanese)
- (8) T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, and T. Kobayashi: "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine", *IEEJ Trans. on IA*, vol. 115, No. 11, pp.1402-1411 (1995) (in Japanese)
- (9) J. A. Tapia, F. Leonardi, and T. A. Lipo: "Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability", *IEEE Trans. on IA*, vol. 39, No. 6, pp.1704-1709 (2003)
- (10) M. Namba, K. Hiramoto, and H. Nakai: "Novel Variable-Field Motor with a Three-Dimensional Magnetic Circuit", *IEEJ Trans. on IA*, vol. 135, No. 11, pp.1085-1090 (2015) (in Japanese)
- (11) T. Ogawa, T. Takahashi, M. Takemoto, H. Arita, A. Daikoku, and S. Ogasawara: "The Consequent-Pole Type Ferrite Magnet Axial Gap Motor with Field Winding for Traction Motor Used in EV", *SAEJ Proc. of EVTeC & APE Japan 2016*, No. 20169094 (2016)
- (12) T. Kosaka, T. Hirose, and M. Matsui: "Brushless Synchronous Machines with Wound-Field Excitation using SMC Core Designed for HEV Drives", *Power Electronics Conference International (IPEC2010)*, pp. 1794-1800 (2010)
- (13) A. Ozeki, T. Kosaka, and N. Matsui: "Design Studies on Hybrid Excitation Motor for Vehicle Propulsion", *IEEJ Technical Meeting*, MD-15-77, RM-15-58, VT-15-5, pp. 23-28 (2015) (in Japanese)
- (14) T. Kato, M. Minowa, H. Hijikata, and K. Akatsu: "High Efficiency IPMSM Effectively Utilizing Variable Leakage Flux Characteristics", *IEEJ JIASC 2014*, No. 3-13, pp. 139-142 (2014) (in Japanese)
- (15) I. Urquhart, D. Tanaka, R. Owen, Z. Q. Zhu, J. B. Wang, and D. A. Stone: "Mechanically Actuated Variable Flux IPMSM for EV and HEV Applications", *Proc. of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicle Symposium 2013*, pp. 0684-0695 (2013)
- (16) M. Aoyama, K. Nakajima, and T. Noguchi: "Proposal of Electrified Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux Motor", *IEEJ Annual Meeting 2016*, No. 5-043, pp. 77-78 (2016) (in Japanese)
- (17) M. Aoyama, K. Nakajima, and T. Noguchi: "Experimental Verification of Electrically Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux PM Motor", *IEEJ Technical Meeting*, SPC-17-010/MD-17-010 (2016) (in Japanese)
- (18) M. Aoyama, and T. Noguchi: "Experimental Verification of Radial-Air-Gap-Type Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles", *IEEJ Trans. on IA*, vol. 135, No. 8, pp.869-881 (2015)