

# 電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの磁極相対位置に関する検討

青山 真大\*, 中島 一清 (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Relative Position of Magnetic Poles of Electrically Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux PM Motor  
Masahiro Aoyama\*, Kazukiyo Nakajima (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a variable magnetic flux PM motor in which space harmonic power is utilized for the magnetic flux weakening, 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 magnetomotive force of axial-gap rotor can be retrieved a space harmonic power, which is inevitably generated by a concentrated winding stator. The effects of relative position of magnetic poles between the radial-gap rotor and the axial-gap rotors are conducted through the FE-analysis. Consequently, it is clarified that the relative position of magnetic poles in 60 electrical degree offset against fully reversal magnetic pole position is the most effective position for the variable magnetic flux ratio, and the torque performance. In addition, the self-excitation is experimentally demonstrated with prototype machine.

キーワード：可変界磁，スキュー角，トロイダル巻，自己励磁，マルチギャップ，磁極反転

(Keyword: variable magnetic flux, skew angle, toroidal winding, self-excitation, multi-gap, reversal magnetic pole)

## 1. はじめに

近年，欧州を中心に 48V マイルド HEV システムの技術開発が盛んに行われている。48V システムは高電圧のフル HEV システムに比べれば燃費改善効果が劣るが，一方で車両重量が軽量の B セグメント以下のコンパクトカーにとっては小型軽量で安価な HEV システムとなり，コストメリットと燃費改善効果を得やすい。一方で，低電圧駆動のため，可変界磁可能なクローポール形モータとインバータを組み合わせた ISG システムが主流となっているが，クローポール形モータの場合，スリップリングを用いた他励式のため，大出力化に伴い従来よりも界磁電流を増やす必要に対して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，鉄損増加による高効率化が困難である。

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。図 1(a)に示すように磁石磁束  $\Psi_m$  が可変になることで電機子鎖交磁束の調整と磁石磁束による鉄損割合が大きい駆動点での高効率化が可能となる。

今日の代表的な研究として，①PMSM の磁石磁力を可変にするメモリモータ方式，②ロータスキュー角を調整する方式，③コンシクエントポールの磁化量を調整する方式，④漏れ磁束を活用する方式が挙げられる<sup>(1)-(12)</sup>。①の場合，

広い可変界磁レンジで駆動できるため各駆動点で最適なロータ界磁を得ることができるが一方でパルス電流を電機子電流に重畳して駆動中に着減磁を行うため，瞬時的なトルクリップルの発生とモータ出力に対して必要以上に大容量のインバータが必要になる<sup>(1)-(4)</sup>。②の場合，ロータスキュー角を機械的に調整するための外部アクチュエータが必要にな

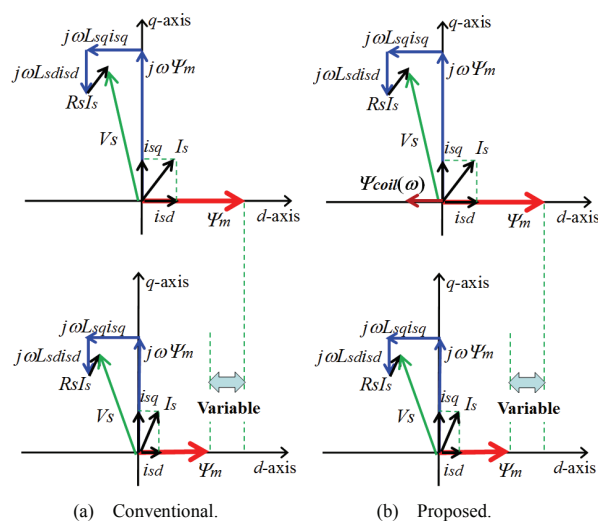


Fig. 1. Effect of variable magnetic flux technique. (Flux intensifying type).

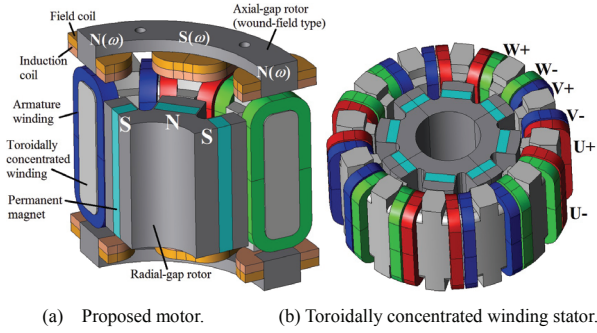
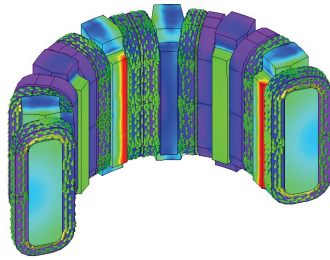
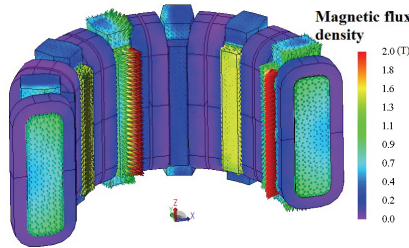


Fig. 2. Proposed variable magnetic flux PM motor.



(a) Armature current vectors.



(b) Magnetic flux contour and vectors.

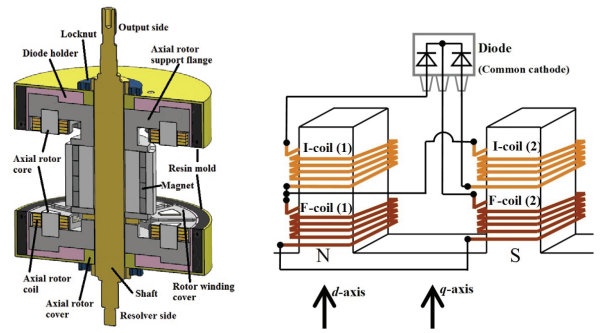
Fig. 3. Armature current and magnetic flux vectors.

る<sup>(5)(6)</sup>。③の場合、静止磁界を発生させるためのコイルと DC/DC コンバータが必要になり且つ、原理的にリラクタンストルクの活用が困難である<sup>(7)-(10)</sup>。④の場合、シンプルな構造でパッシブに可変界磁可能だが可変界磁レンジが狭く、文献(11)はトルク密度が低い、文献(12)は短絡磁路用の端板を駆動するアクチュエータが必要という課題がある<sup>(11)(12)</sup>。

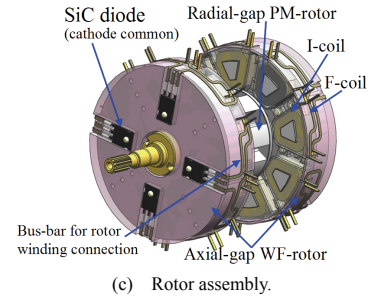
それらの課題に鑑み、筆者らはパルス電流やアクチュエータを不要とし、図 1(b)に示すように回転速度の増加とともに自動的に永久磁石磁束に対して反転（スキュー電気角 180 deg）した電磁石磁束  $\Psi_{coil}(\omega)$  を形成することでパッシブに可変界磁を実現する PM モータを既に提案した<sup>(13)</sup>。本稿では、磁石磁極と電磁石磁極の磁極相対位置（スキュー電気角 180 deg を変更）に対するモータ性能との関係について、電磁界解析により性能予測を行い、自励の実機検証を行ったので報告する。

## 2. 提案モータの構造

図 2 に提案モータの全体構造を示す。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、アキシアルギャップ 2 面に自励式巻線界磁ロータ（SE-WF ロータ）を配



(a) Rotor assembly. (b) Rotor rectifier circuit.



(c) Rotor assembly.

Fig. 4. Rotor configuration of prototype.

置している。同図は一例として PM ロータと SE-WF ロータの磁極配置を電気角で 180 deg 反転させた構造としているが、本稿ではこの磁極相対位置を変化させたときのモータ諸性能への影響を検証する。PM ロータの磁極は永久磁石のため起磁力一定であるが、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（基本波同期回転座標上では第 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って変化）となる<sup>(14)</sup>。集中巻トロイダルステータコアと SE-WF ロータコア材質は磁路が 3 次元となるため SMC（圧粉鉄心）を用いる。図 3 に示すように集中巻トロイダルステータは突極を挟んで対向するコイルに逆方向に電流を流すことで 3 次元的に磁束を発生させることが可能となる。図 4 にロータ構造を示す。PM ロータコアは電磁鋼板、SE-WF ロータコアは SMC を用いる。各ロータはシャフトに機械的に連結され同期速度で回転する。図 4(a)に示すように SE-WF ロータの突極にはフラットワイズで  $\alpha$  巻した誘導コイル（I-coil）と界磁コイル（F-coil）を軸方向に積み重ねて取り付け、図 4(b)に示す整流回路で図 4(c)のバックヨーク側に配置したダイオードと結線する構成である。第 2 次空間高調波はギャップ近傍に多く鎖交するため I-coil をギャップ面側、F-coil を SE-WF ロータの突極根元側に配置している<sup>(14)</sup>。

図 5 にトロイダルステータの電機子起磁力に重畳している第 2 次空間高調波の磁束ベクトルを示す。この静止座標系における第 2 次空間高調波（基本波同期回転座標上の第 3 次時間高調波）が I-coil に鎖交することで誘導起電力が発生し、その誘導起電力をダイオード整流して F-coil に界磁電流を流すことで自己励磁により磁極が形成される。I-coil の誘

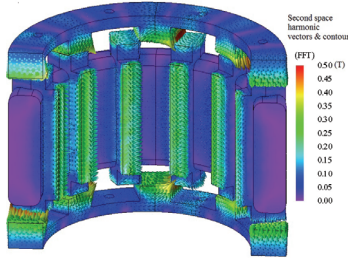


Fig. 5. Second space harmonic vectors and contour.

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 magnetomotive force	1272 A <sub>rms</sub> T (60 s)
Number of stator coil-turn	18
Armature winding connection	4 parallel
Number of rotor induction coil-turn	30
Number of rotor field coil-turn	30
Armature 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)

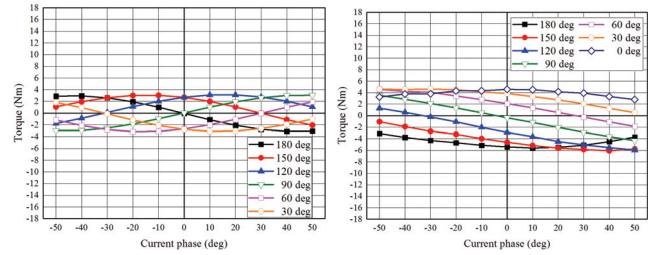
導起電力はファラデーの法則に基づくため、回転速度の増加とともにSE-WFロータ起磁力が増加していく。その結果、磁極を反転させて配置したPMロータの磁束ベクトルとSE-WFロータの磁束ベクトルが対向して電機子巻線に鎖交するため、回転速度の増加とともに電機子鎖交磁束を減少でき、結果として自動的に線間電圧を抑制できる。

### 3. 電磁界解析による性能予測

表1に原理検証機の主要諸元を示す。この条件において電磁界解析により可変界磁特性の確認を行った。解析は(株)JSOL製のJMAG-Designer ver.14.1を用いて正弦波電流源で解析を行い、鉄損は考慮していない。

#### 〈3.1〉電流位相-トルク特性

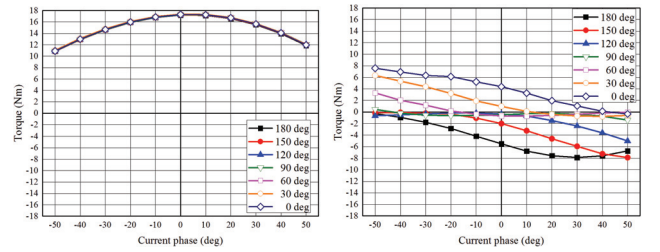
図6、図7に回転速度2000 r/min、電機子起磁力890 A<sub>rms</sub>T一定の励磁条件下でスキュー電角を0 degから180 degまで30 deg毎に変化させたときの電流位相-トルク特性を示す。ここで図8に示すように、スキュー電角0 degはPMロータとSE-WFロータの極性が一致、スキュー電角180 degは両ロータの極性が反転していることを意味する。電流位相基準はPMロータのN極磁石磁極(d軸)を0 degとしている。図6に示すようにSE-WFロータの磁極位置(スキュー角)を変化させていくとリラクタンストルク(SE-WFロータ巻線を開放状態で計算)の電流位相-トルク特性は



(a) Reluctance torque.

(b) Electromagnet torque.

Fig. 6. Current phase-vs.-pancake-axial-gap rotor torque characteristics with respect to electrical skew angle under 890 A<sub>rms</sub>T for 2000 r/min.



(a) Radial-gap rotor torque.

(b) Pancake-axial-gap rotor torque.

Fig. 7. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to electrical skew angle under 890 A<sub>rms</sub>T for 2000 r/min.

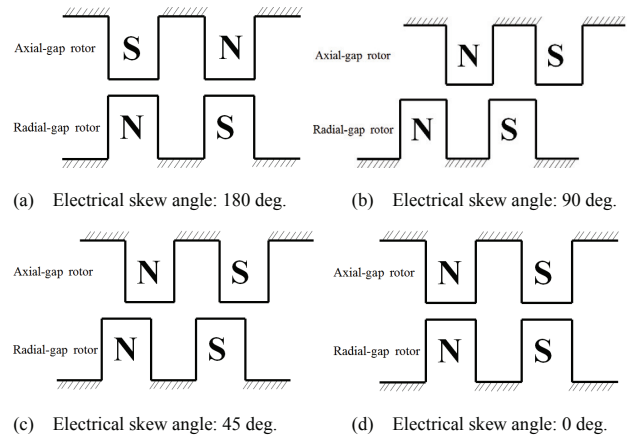
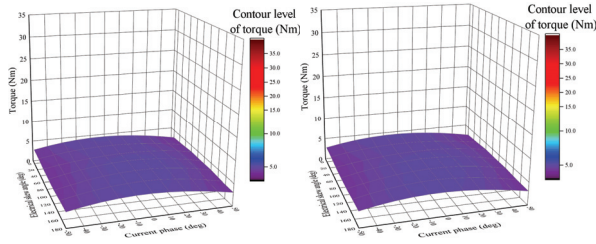


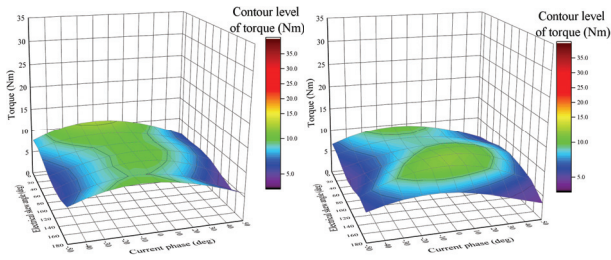
Fig. 8. Relative position between axial-gap rotor and radial-gap rotor.

振幅が変わらず位相特性がシフトすることが確認できる。順突極構造のため、スキュー電角180 degの結果と0 degの結果は同じになる。同図(b)の自励式電磁石トルクも振幅が変わらず位相特性がシフトすることが確認できる。電磁石トルクは図7(b)のSE-WFロータトルクから図6(a)のSE-WFロータのリラクタンストルクを差分することで求めている。ここで自励式電磁石トルクは図8(d)のスキュー電角0 degのときPMロータと極性が一致するため正トルク特性となり、図8(a)のスキュー電角180 degのときはPMロータと極性反転するため負トルク特性となることが確認できる。図7(a)のPMロータトルクの結果からSE-WFロータの相対磁極位置の影響を受けていないことが確認できる。3次元磁路とすることでラジアル面の磁路とアキシャル面の磁路が直交関係となり、磁気干渉していない。



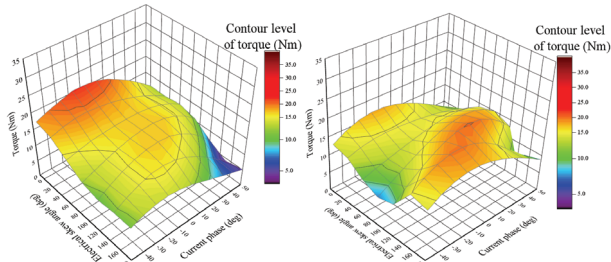
(a) With rotor winding rectified. (b) With rotor winding opened.

Fig. 9. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to electrical skew angle under 255  $A_{rms}T$  for 2000 r/min.



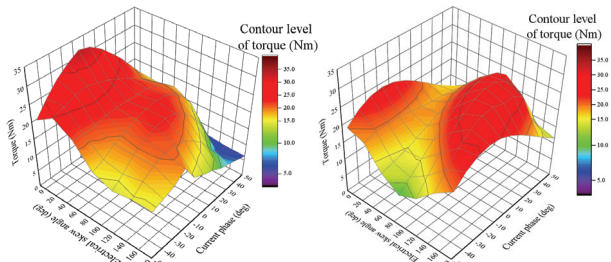
(a) With rotor winding rectified. (b) With rotor winding opened.

Fig. 10. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to electrical skew angle under 509  $A_{rms}T$  for 2000 r/min.



(a) With rotor winding rectified. (b) With rotor winding opened.

Fig. 11. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to electrical skew angle under 890  $A_{rms}T$  for 2000 r/min.

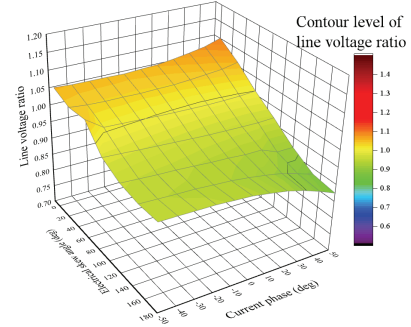


(a) With rotor winding rectified. (b) With rotor winding opened.

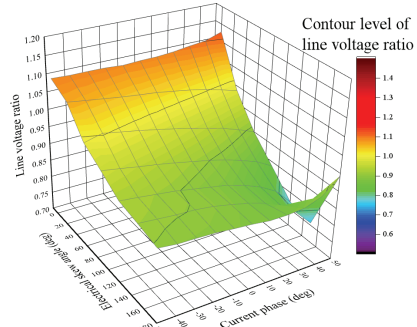
Fig. 12. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to electrical skew angle under 1272  $A_{rms}T$  for 2000 r/min.

### 〈3.2〉 スキュー角に対する可変速特性

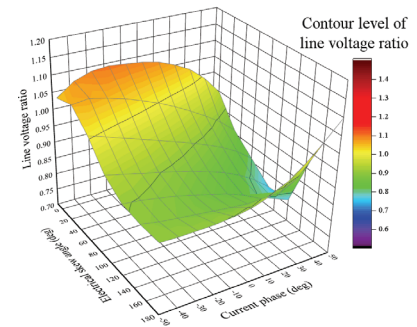
回転速度 2000 r/min 一定で、電機子起磁力を変更させたときのスキュー角に対する電流位相-トルク特性と、比較対象としてロータ巻線を開放状態にした結果を図 9 から図 12 に示す。同図からスキュー角が 0 deg (強め界磁) から 180 deg (弱め界磁) に近づくに従い、提案モータはトルクが低下する傾向になることがわかる。図 13 に図 9 から図 12 と同じ駆動条件における電機子巻線の線間電圧比  $\sigma$  を示す。線間



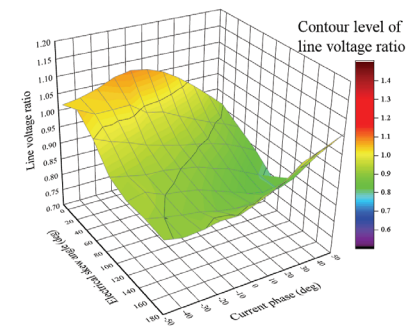
(a) Armature magnetomotive force 255  $A_{rms}T$ .



(b) Armature magnetomotive force 509  $A_{rms}T$ .



(c) Armature magnetomotive force 890  $A_{rms}T$ .



(d) Armature magnetomotive force 1272  $A_{rms}T$ .

Fig. 13. Current phase-vs.-line voltage ratio characteristics with respect to electrical skew angle for 2000 r/min.

電圧比  $\sigma$  は SE-WF ロータ巻線を開放にしたときの線間電圧  $V_{opened}$  に対する SE-WF ロータ巻線を整流回路結線したときの線間電圧  $V_{closed}$  の比率 ( $\sigma = V_{closed}/V_{opened}$ ) で定義している。同図より、スキュー角 0 deg は強め界磁状態になるため  $\sigma$  が 1.0 を上回る結果となる。一方、スキュー角が進角 (弱め界磁状態) していくに従い、 $\sigma$  が 1.0 よりも低い値になることが確認できる。しかし、電機子起磁力が増加するに従い、ス

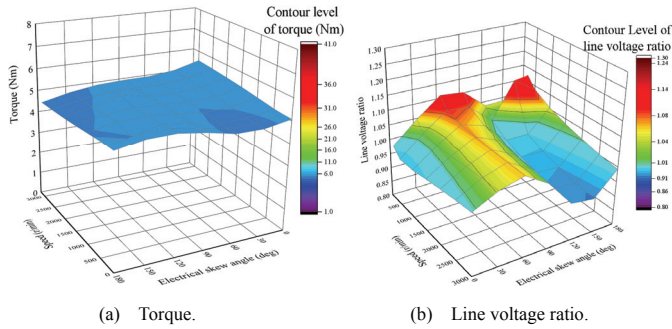


Fig. 14. Adjustable speed drive torque and line voltage ratio characteristics with respect to electrical skew angle under 255  $A_{rms}T$ .

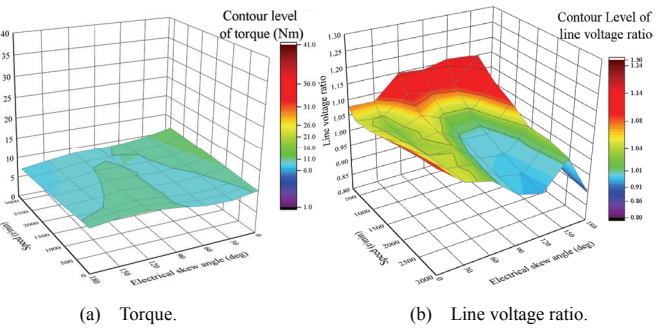


Fig. 15. Adjustable speed drive torque and line voltage ratio characteristics with respect to electrical skew angle under 509  $A_{rms}T$ .

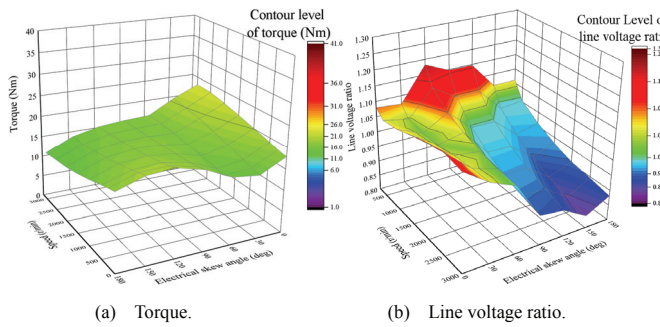


Fig. 16. Adjustable speed drive torque and line voltage characteristics with respect to electrical skew angle under 890  $A_{rms}T$ .

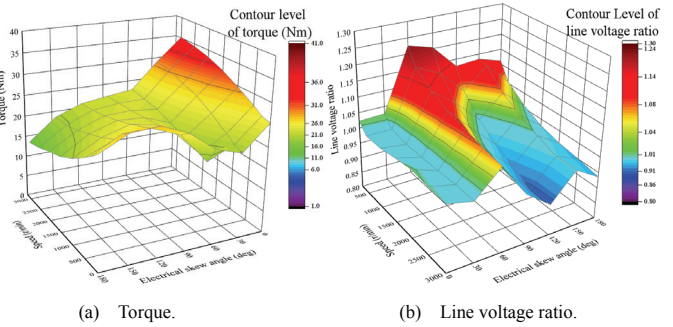


Fig. 17. Adjustable speed drive torque and line voltage ratio characteristics with respect to electrical skew angle under 1272  $A_{rms}T$ .

スキュー角に対して $\sigma$ が比例して減少していくのではなくスキュー角が90 degから180 degの間に極小点が存在することがわかる。このとき、図9から図12よりスキュー角180 degの完全磁極反転よりも線間電圧比 $\sigma$ に対するトルク $T$ の比 $\eta$  ( $\eta=T/\sigma$ )が最大になるスキュー角のほうがモータ性能(トルク密度、可変速特性、効率)を向上できると言える。

次に図14から図16にMTPA点駆動させたときのスキュー角に対する可変速特性を示す。各図より各電機子起磁力によって線間電圧比 $\sigma$ に対するトルク $T$ の比 $\eta$ が最大になるスキュー角が異なることがわかる。可変速トルク特性の拡大に焦点を当てると電機子起磁力が最大の際に線間電圧がもっとも抑制されるスキュー角が望ましいと言える。よって、スキュー角30 deg刻みで検討した結果においてはスキュー角120 degが可変速トルク特性拡大に対してもっとも望ましい。図18にスキュー角180 degとスキュー角120 degのときの電機子起磁力1272  $A_{rms}T$ における可変速特性(トルク、線間電圧)を示す。同図(a)、(b)よりスキュー角120 degのほうが線間電圧比 $\sigma$ に対するトルク比 $\eta$ が高く可変速特性の拡大が可能であることがわかる。同図(c)に同図(a)のトルク分離をした結果を示す。図7(a)でスキュー角に対してラジアルギャップロータ(PMロータ)のトルクが変化しないことを示したが一方で、図6でスキュー角によってアキシアルギャップロータ(SE-WFロータ)のトルク特性が変化することを示した。すなわち、スキュー角120 degと180 degでMTPA点が異なるため、SE-WFロータがリラクタンストルクのみの0 r/minにおいて図18(c)でPMロータトルクが異なる結果となっている。このとき、スキュー

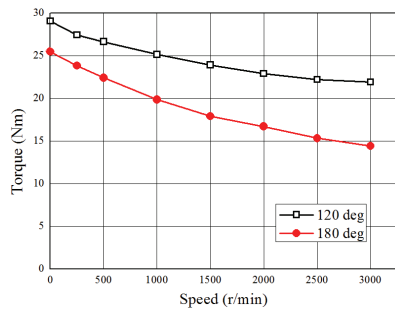
一角180 degのMTPA点が-30 degであるのに対し、スキュー角120 degのMTPA点が0 degとなる。その結果、電流位相が強め界磁側から進角する(弱め界磁側)ことになり、スキュー角120 degのほうがトルクに対する線間電圧の抑制が可能となる。

#### 4. 自己励磁の実機検証

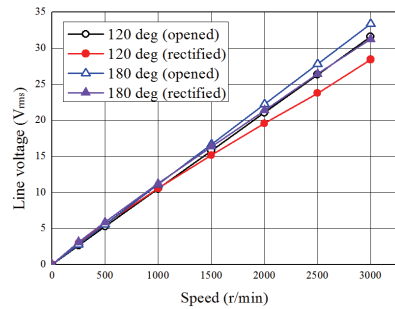
図19(a)~(c)に示す小型原理検証機にてSE-WFロータの自励現象の実機検証を行った。ロータ電流は図19(d)に示すように1極対分の整流回路をスリップリングを介して接続することで測定した。図19(d)に回転速度1800 r/min、電機子起磁力405  $A_{rms}T$ 、電流位相-20 deg時のロータ誘導電流測定結果を示す。同図より、集中巻トロイダルステータで不可避に発生する第2次空間高調波(同期回転座標上では第3次時間高調波)をアキシアルギャップ面に配置したダイオード整流形巻線界磁ロータにて自励に活用できることを実機で確認できた。

#### 5. まとめ

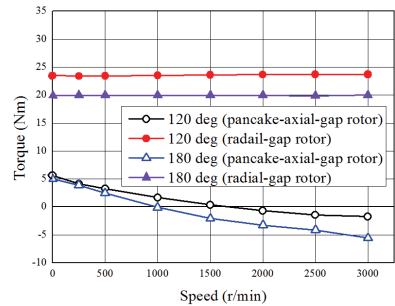
本稿ではパルス電流やアクチュエータを不要とし、回転速度の増加とともに自動的に反転磁極(スキュー電気角180 deg)が徐々に形成されることでパッシブに可変界磁可能なモータのPMロータとWFロータの磁極相対位置について検討した。電磁界解析により、磁極相対位置を変更したときのモータ諸特性を明らかにし反転磁極(180 deg)よりも磁極相対位置が120 degの場合のほうがモータ諸特性(トルク密度、可変速特性、効率)を向上できることがわかつ



(a) Rotation speed-vs.-torque characteristics.



(b) Rotation speed-vs.-line voltages characteristics.



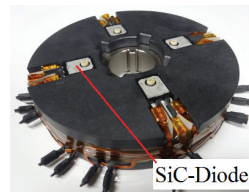
(c) Radial-gap rotor torque and pancake-axial-gap rotor torque.

Fig. 18. Adjustable speed drive characteristics of electrical skew angle 120 deg and 180 deg under 1272  $A_{rms}$ T.

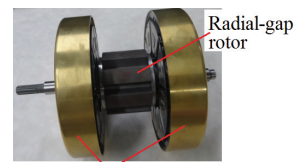
た。また小型試作機にて自励の実機検証を行った。今後は、試作機により駆動特性を明らかにするとともに、各起磁力（電機子、永久磁石、自励式電磁石）とアスペクト比のバランス調整を行い、可変界磁量の拡大に取り組む予定である。

## 文 献

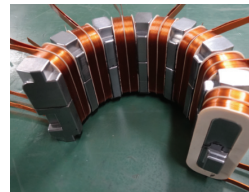
- (1) Ostovic, V.: "Memory Motors", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 9, pp.52-61 (2003)
- (2) Ostovic, V.: "Memory Motors – a New Class of Controllable Flux PM Machines for a True Wide Speed Operation", *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference*, 2001, vol. 4, pp.2577-2584 (2001)
- (3) K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, and L. Kovudhikulrungsri: "Principle and Basic Characteristics of Variable Magnetic-Force Memory Motors", *IEEE Trans. on IA.*, vol. 131, No. 1 pp.53-60 (2011) (in Japanese)
- (4) 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)
- (5) T. Nonaka, S. Oga, and M. Ohto: "Consideration about the Drive of



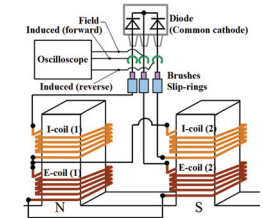
(a) Axial-gap rotor with diode.



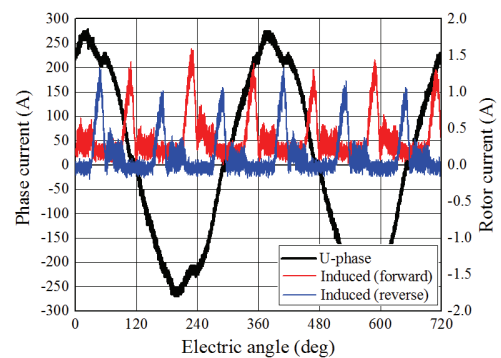
(b) Rotor assembly.



(c) Segmented stator.



(d) Rotor current measurement via slip-ring.



(e) Armature current and rotor induced currents under 405  $A_{rms}$ T, and current phase -20 deg for 1800 r/min.

Fig. 19. Prototype machine and experimental test results.

Variable Magnetic Flux Motor", *IEEE Trans. on IA.*, vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015) (in Japanese)

- (6) 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)
- (7) T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, and T. Kobayashi: "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine", *IEEE Trans. on IA.*, vol. 115, No. 11, pp.1402-1411 (1995) (in Japanese)
- (8) 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)
- (9) M. Namba, K. Hiramoto, and H. Nakai: "Novel Variable-Field Motor with a Three-Dimensional Magnetic Circuit", *IEEE Trans. on IA.*, vol. 135, No. 11, pp.1085-1090 (2015) (in Japanese)
- (10) 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)
- (11) T. Kato, M. Minowa, H. Hijikata, and K. Akatsu: "High Efficiency IPMSM Effectively Utilizing Variable Leakage Flux Characteristics", *IEEE JIASC 2014*, No. 3-13, pp. 139-142 (2014) (in Japanese)
- (12) 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)
- (13) M. Aoyama, K. Nakajima, and T. Noguchi: "Proposal of Electrified Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux Motor", *IEEEJ Annual Meeting 2016*, No. 5-043, pp. 77-78 (2016) (in Japanese)
- (14) M. Aoyama, and T. Noguchi: "Experimental Verification of Radial-Air-Gap-Type Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles", *IEEE Trans. on IA.*, vol. 135, No. 8, pp.869-881 (2015)