

電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの実機検証

青山 真大*, 中島 一清 (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Experimental Verification of Electrically Reversal Magnetic Pole 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 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. These rotors are coaxially fastened with opposite magnetic pole position. The magnetomotive force of axial-gap rotor can be automatically retrieved a space harmonic power, which is inevitably generated by a concentrated winding stator. A mechanical design of the prototype is revealed, and the operation principle of the automated-magnetic flux weakening is 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，磁極反転

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

1. はじめに

近年，欧州を中心に 48V マイルドハイブリッド (Mild-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。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，鉄損増加により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 Ψ_m が可変になることで電機子鎖交磁束の調整による可変速領域の拡大と，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ーモータ方式，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⁽¹⁾⁻⁽¹²⁾。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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。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もしくはロータの相対回転を防止するロック機構が必要になる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。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⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。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)

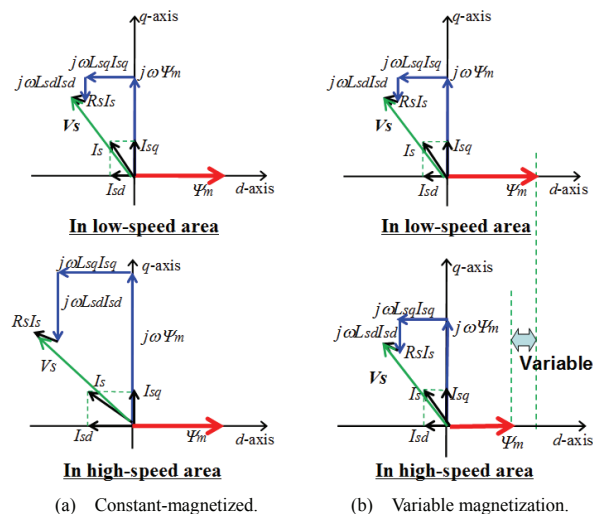


Fig. 1. Effects of variable magnetic flux technique.

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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

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、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⁽¹³⁾。本稿では、小型原理検証機を試作し、実際の運転特性と可変界磁効果について明らかにしたので報告する。

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（基本波に対して逆相のため、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⁽¹⁴⁾。集中巻トロイダルステータコアの材質は磁路が三次元となるため軟磁性複合材（SMC：Soft Magnetic Composites）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三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 ロータコアは三次元磁路のため 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 α 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結線基板のダイオードと結線した構成である。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⁽¹⁴⁾。

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 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、PM ロータの磁束ベクトルと、磁極を反転させて配置した 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. 原理検証機の構造と主要諸元

三次元磁路のため、SMC（ヘガネス製 Somaloy 3P）を

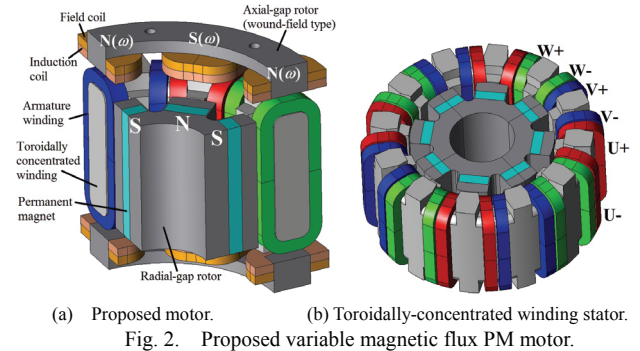


Fig. 2. Proposed variable magnetic flux PM motor.

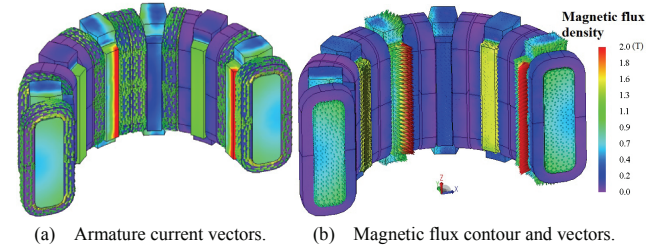


Fig. 3. Armature current and magnetic flux vectors.

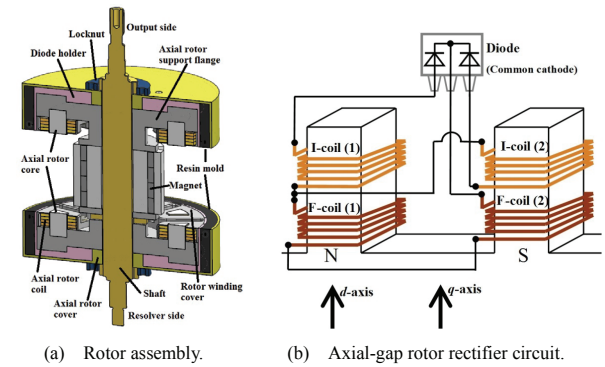


Fig. 4. Rotor configuration of prototype.

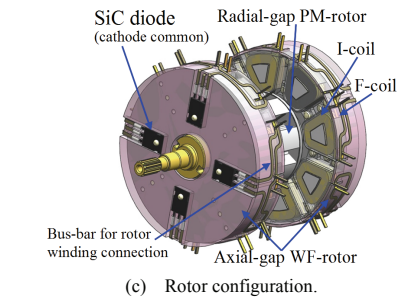
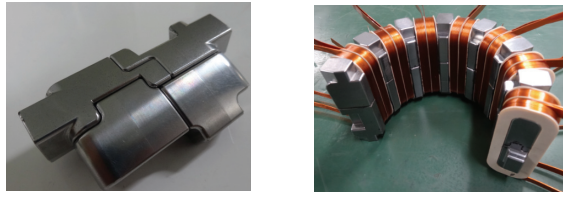
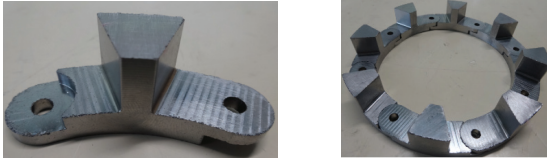


Fig. 5. Second-order space harmonic contour and vectors.

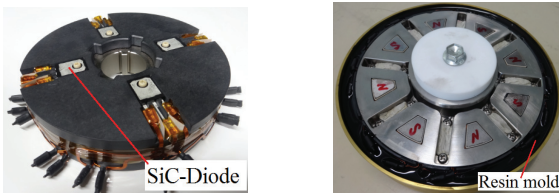
用いる。パウダー状の磁性粒材を 100 トンプレス機で金型成形する際にコアピースの重量密度が $7.4\sim 7.5 \text{ g/cm}^3$ を満たすように図 6(a)のステータコアは突極部とヨーク部で周



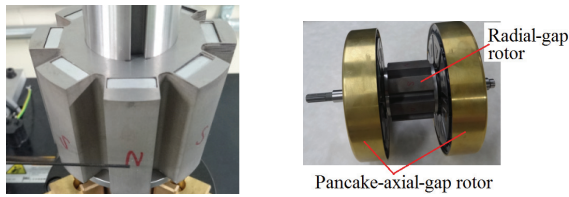
(a) Stator core pieces. (b) Segmented stator.



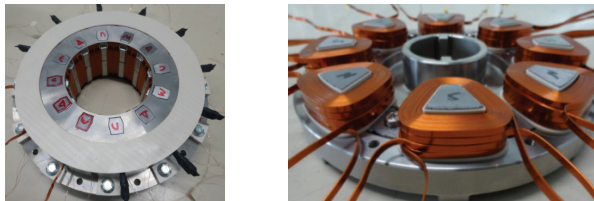
(c) Rotor core piece. (d) Segmented rotor core.



(e) Axial-gap rotor. (f) Resin mold of axial-gap rotor.



(g) Radial-gap rotor. (h) Rotor assembly.



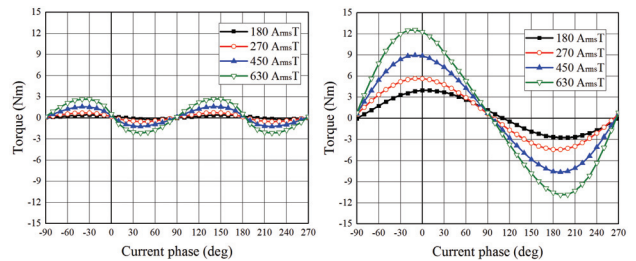
(i) Stator assembly. (j) Axial-gap rotor windings.

Fig. 6. Actual prototype machine.

方向に 12 分割，軸方向に 2 分割した構造にしている。同様に図 6(c)に示すようにロータコアも分割形状としている。ステータコアをセグメント構造にすることで，図 6(b)に示すようにエッジワイズ巻でプリ成形したトロイダルコイルをインシュレータ（PPS 製）を介してヨーク部に取り付け，環状に組上げていくことが可能になり，コイル占積率の向上を実現している。SE-WF ロータコアの保持はアキシャル方向の機械強度対策としてステンレス製（SUS303）の保持部品を用いる。コアに設けたボルト穴を通じて保持部品に固定し，保持部品はシャフトに機械的に連結させる。またロータ巻線の保護には同じく SUS303 製の保護部品により巻線を覆い，図 6(f)のように巻線の脱落を防止する。ロータコア保持部品の背面に結線基板を載せ，その上から結線保護とロータバランス修正機能を兼ねた真鍮製カバーを被せ

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	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)



(a) Without PMs and SE-WF rotor winding opened. (b) With PMs and SE-WF rotor winding opened.

Fig. 7. Current phase-vs.-torque characteristics.

た構造とする。アキシャル方向のギャップ管理はシャフトに設けた凸部で片側の PM ロータとアキシャルロータの位置出しを行い，もう片側は SE-WF ロータの保持部材のフランジ部分で位置出しを行っている。また，バランス修正の作業性も考慮してフランジ部分で位置出しする SE-WF ロータはシャフトに対して隙間嵌めとし，軸方向からロックナットで締結する構造設計としている。そのため，ロータ ASSY でバランス修正後，SE-WF ロータの隙間嵌め側を取り外し，トロイダルステータに組み付けてモータとして完成させることが可能となる。表 1 に原理検証機の主要諸元を示す。コア材料は SMC がヘガネス製 Somaloy 3P，電磁鋼板が新日鉄住金製 30DH（板厚 0.3 mm）であり，PM ロータの磁石は信越化学製 N39UH（ $B_r = 1.22$ T， $H_{cb} = 965.7$ kA/m @293 K）である。

〈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，リラクタンストルクと磁石トルクの分離を行うため，未着磁磁石を用いて且つ，SE-WF ロータ巻線を開放した状態でリラクタンストルクの測定を行った。次に着磁済磁石を用いて SE-WF ロータ巻線を開放した状態と結線した状態でそれぞれトルク測定を行った。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い，トルク検出には HBM 製トルク

フランジ (T10FS) を用いた。トルク測定値はトルク計アンプ内で 30 Hz のローパスフィルタを介して 1 秒間隔で 5 回平均した値である。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の検出温度が常温から 90 °C 以内になる範囲とした。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。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において十分高い 200 V で設定して測定を行った。図 7 に回転速度 500 r/min、電機子起磁力 630 A_{rms}T 以下の条件で電流位相を 10 deg 刻みで測定した電流位相-トルク特性を示す。同図から、PM ロータは突極部分に磁石を配置しているため、磁石トルクが支配的となり、電機子起磁力が低い領域では SPM (Surface Permanent Magnet) モータの電流位相-トルク特性となる。一方、電機子起磁力が増加するに従い、順突極性を有した SE-WF ロータのリラクタンストルクが加算され、強め界磁領域に MTPA (Max Torque Per Ampere) 点が存在することが確認できる。

(3.2) 可変速特性

可変速運転時におけるトルク特性の一例 (電機子起磁力を 90 A_{rms}T, 180 A_{rms}T, 270 A_{rms}T, 360 A_{rms}T, 450 A_{rms}T, 630 A_{rms}T とし、回転速度を 750 r/min と 2000 r/min で比較した結果) を図 8 に示す。同図より、回転速度および電機子起磁力の増加によってトルクが低下していることが確認できる。提案モータの SE-WF ロータの誘導起電力はファラデーの法則に基づいているため、回転速度の増加によって反転磁極の磁化量が自動的に強められ、磁石磁束を打ち消すことでトルクが低下している。さらに、電機子起磁力の増加によって反転磁極の界磁エネルギー源となる第 2 次空間高調波がパッシブに増加するため、電機子起磁力が高くなるに従いトルクの減少幅も増加している。

(3.3) 効率特性

図 9 に測定した効率マップ (力行駆動) を示す。試験環境と原理検証用試作機の機械構造設計の都合上、リラクタンストルク測定時は回転速度の上限を 3000 r/min とし、SE-WF ロータ開放時と結線時は 2000 r/min を上限として実験を行った。効率マップは電機子起磁力を 90 A_{rms}T, 180 A_{rms}T, 270 A_{rms}T, 360 A_{rms}T, 450 A_{rms}T, 630 A_{rms}T としたときの MTPA 点を回転速度 500 r/min から 2000 r/min まで 250 r/min 刻みで測定した結果をプロットすることで描いている。ここで電機子起磁力は 630 A_{rms}T (設計値の 70 % 負荷) を上限としている。図 6 に示すようにに磁気特性とコアピースの機械強度を確保するために分割コアで試作したため、ステータコア ASSY の電磁振動に対する強度不足と冷却設計の問題により、机上検討時の最大負荷で実験を行うことができなかった。図 9(b) と図 9(c) を比較すると、提案モータは Reference モデル (SE-WF ロータ巻線を開放状態) に対して、回転速度の増加とともに最大トルクが減少していることが確認できる。このことから、回転速度の増加に伴い自動的に SE-WF ロータの反転磁極の磁化量が増加して自動的に弱め界磁ができていることがわかる。

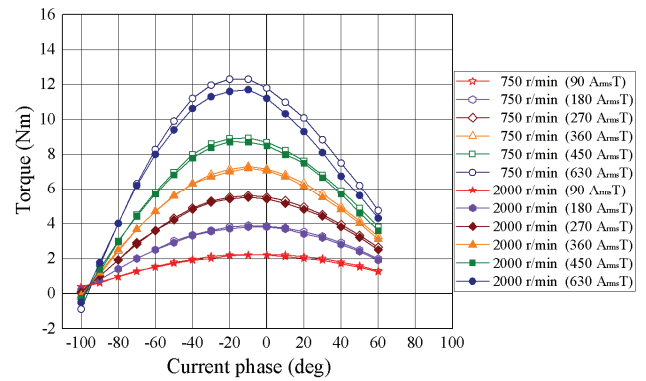
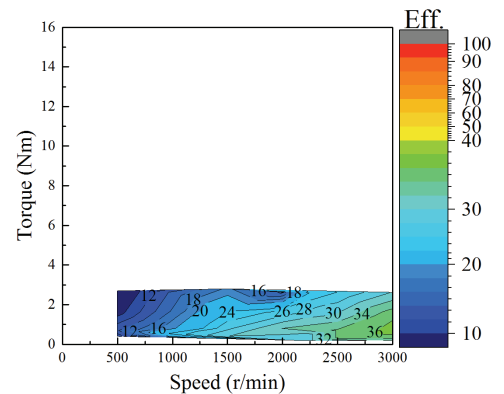
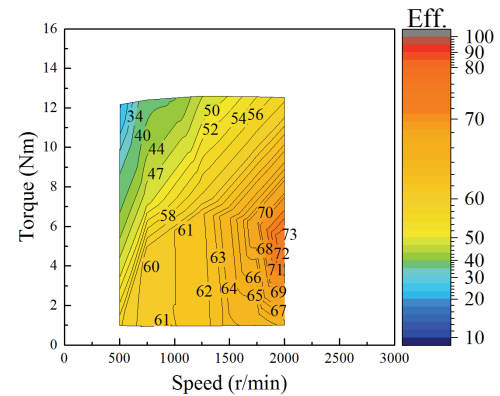


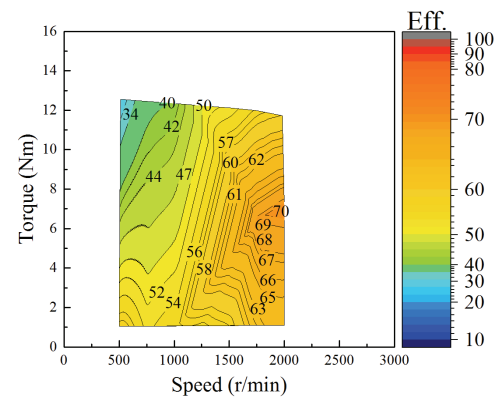
Fig. 8. Current phase-vs.-torque characteristics for 750 r/min and 2000 r/min.



(a) Without PMs and SE-WF rotor winding opened.

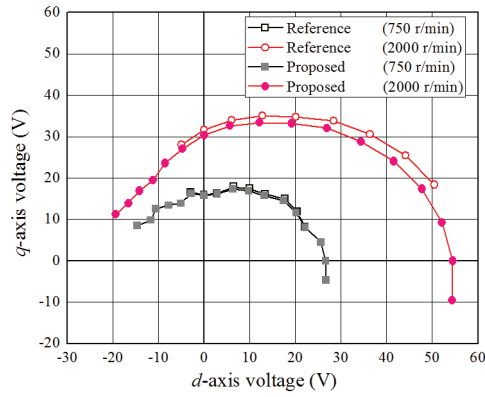


(b) With PMs and SE-WF rotor winding opened.

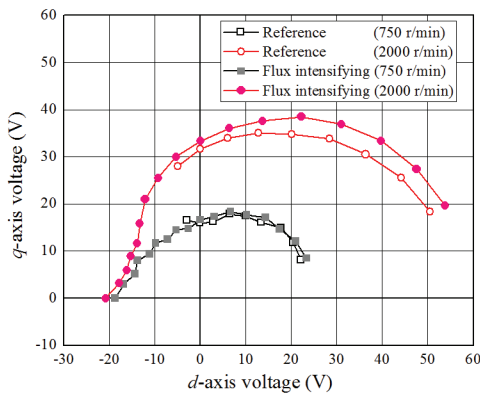


(c) With PMs and SE-WF rotor winding rectified.

Fig. 9. Motor efficiency maps in motoring.



(a) Proposed (Electrically reversal magnetic pole).



(b) Flux intensifying model.

Fig. 10. dq -axis voltage ellipse under $630 A_{rms} T$.

一方、効率に関しては反転磁極により原理検証を行うことを主目的に設計したため磁気回路が最適化されておらず、一般的な電動回転機と比較して効率が低い結果となった。分割コア形状による磁気抵抗の増加や、保持部材の SUS や金属ボルトでの渦電流損が損失増加の要因になっていると考えられるが、詳細な損失分析については今後の課題とする。

Reference モデルと提案モータを比較すると、回転速度の増加とともに若干効率が低下していることが確認できる。得に低負荷域での効率低下が顕著である。今回は空間高調波による自動的な弱め界磁効果の原理検証のため、電圧制限を考慮せずに MTPA 点での効率をプロットしている。可変界磁技術の本来の目的は、電圧制限下で界磁調整を行うことで可変速特性の拡大と効率向上にあるため、今後、電圧制限の条件を与えて提案モータの効率とトルク（出力）特性が Reference モデルに対してどの程度効果があるかを検証する必要がある。一方で電圧制限にかからない低負荷域でも反転磁極により効率が低下してしまう結果となったため、磁石起磁力、電機子起磁力そして電磁石起磁力のバランス設計を行うことで可変界磁量と効率の相関を分析する必要がある。加えて、反転磁極の形成を望まない低回転且つ低負荷域において、ツェナーダイオード等を用いて界磁電流発生を抑制することでも解決できると考えられる。また SMC 材をモータに応用する場合、三次元磁路の活

用と渦電流損低減効果によるメリットがある一方、磁気特性が電磁鋼板よりも劣る（同じ磁束密度を得るための電機子起磁力が電磁鋼板よりも必要になり、電機子銅損増加）ことと、製造方法により磁気特性が大きく変わるため、必要な磁気特性と強度を得るためのコアピース重量密度を満たしながら、分割数が少なくなるアスペクト比の考慮まで含めた磁気回路と構造設計が重要となる。

〈3.3〉可変界磁レンジ幅

線間電圧を測定し、Reference モデル（SE-WF ロータ巻線解放）と提案モータの結果を比較することで提案する可変界磁効果について実験的に検証を行った。図 10 に測定した線間電圧に対して、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(a)より、Reference モデルに対して、提案モータは dq 軸電圧楕円を抑制できていることが確認できる。750 r/min では Reference モデルと提案モータの dq 軸電圧楕円が重なりほとんど差が見られないが、回転速度が増加することで反転磁極の磁化量が増加して電機子鎖交磁束が自動的に弱められ、 dq 軸電圧楕円が小さくなっていることが確認できる。参考に同図(b)に Reference モデルと強め界磁モデル（Flux intensifying : PM ロータの N 極に対して SE-WF ロータも N 極になるように配置）の dq 軸電圧楕円を比較すると、同図(a)よりも dq 軸電圧楕円の変化量が大きいことがわかる。強め界磁モデルの場合、自励による強め界磁効果によって SE-WF ロータの界磁エネルギー源となる第 2 次空間高調波が増加する傾向となる。一方、提案モータの場合、自励による弱め界磁効果によって第 2 次空間高調波が減少する傾向となる。その結果、反転磁極形成のエネルギー源を自身で弱めることになり、強め界磁モデルの場合よりも可変界磁量が小さくなる。この結果からも前項で述べたように、空間高調波を活用した自励可変界磁技術は必要な可変界磁量に対して各起磁力（磁石起磁力、電機子起磁力、自励電磁石起磁力）のバランス設計が重要となることがわかる。

次に、各電機子起磁力別に可変速駆動させたときの dq 軸電圧楕円を Reference モデルと提案モータで比較した結果を図 11 に示す。同図より、電機子起磁力が低い駆動点では回転速度が増加しても dq 軸電圧楕円に差がない。これは I-coil に発生した誘導起電力が SE-WF ロータ巻線の抵抗と SiC ダイオード（ローム製 SCS230AE2）の抵抗によってジュール損として消費されているためである。電機子起磁力の増加とともにジュール損で消費される損失分よりも大きな誘導起電力を得ることで界磁電流が自動的に生じて反転磁極が形成され、電機子鎖交磁束を自動的に調整できていることが確認できる。

4. 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した電磁石磁極が形成されることでパッシブに可変界磁を実現する PM モータについて述べた。集中巻トロイダルステータのアクシシャルギャ

ップ二面にダイオード整流回路結線した巻線界磁ロータを配置し、集中巻構造で不可避に発生する第2次空間高調波をロータコイルに鎖交させて自動的に磁化し、ラジアルギャップ面のPMロータと反転磁極配置することで可変界磁を実現している。原理検証機にて上記の可変界磁原理を実験的に検証した。その結果、空間高調波を可変界磁エネルギー源として活用した可変界磁を実証できた。

今後は、PMロータとSE-WFロータの磁極相対位置を変更させたときの可変速特性の実機検証を行い、トルク特性と可変界磁レンジの関連の実機検証を進める。さらにSMCコアの作りやすさを考慮した磁気回路設計を行い、必要な可変界磁範囲に対する最適なアスペクト比についても考究していく予定である。

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", *IEEJ 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 Variable Magnetic Flux Motor", *IEEJ 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", *IEEJ 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", *IEEJ 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", *IEEJ 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", *IEEJ 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", *IEEJ Trans. on IA.*, vol. 135, No. 8, pp.869-881 (2015)

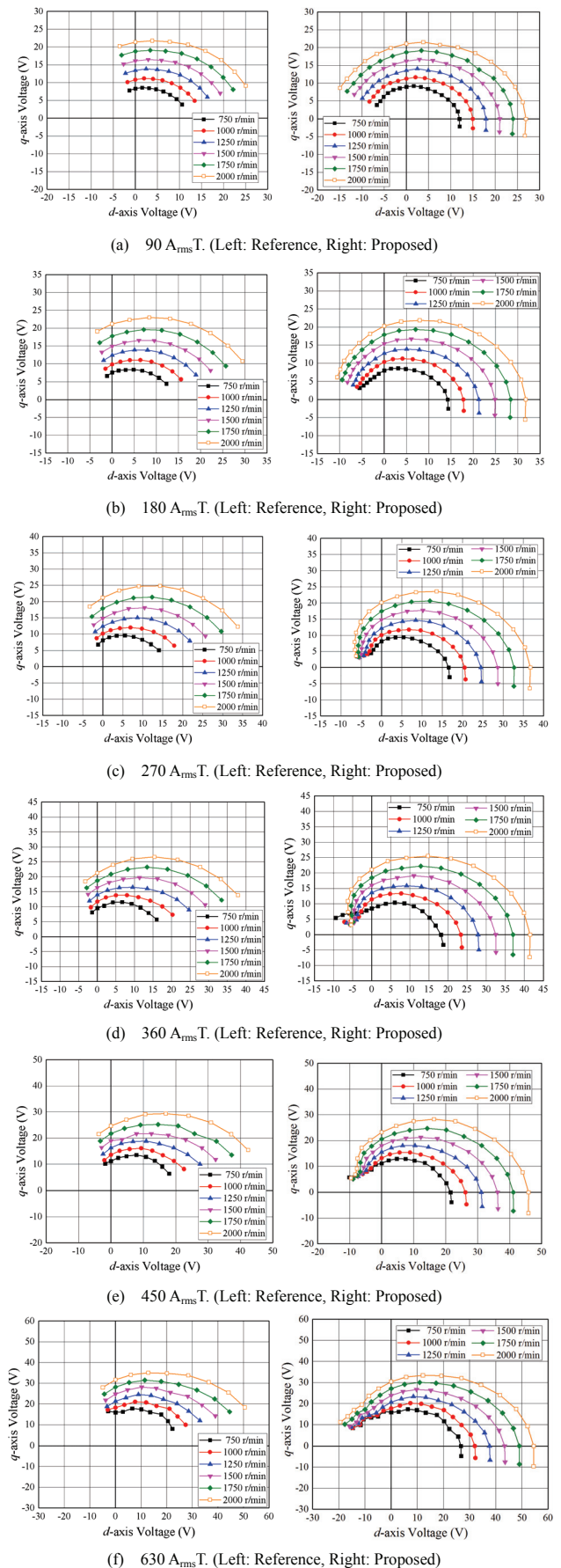


Fig. 11. dq -axis voltage ellipse.