

電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの可変速トルク特性

青山 真大, 中島 一清* (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Adjustable Speed Drive Characteristics 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 which are 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. Magnetomotive force of axial-gap rotor can be retrieved a space harmonic power, which is inevitably generated by a concentrated winding structure. A mechanical design of the prototype is revealed, and the operation principle of the automated-magnetic flux weakening is clarified through the FE-analysis. Consequently, the effect of automated-armature line voltage decrease is investigated with respect to rotation speed increase.

キーワード : 可変界磁, トロイダル巻, 自励式巻線界磁, 磁極反転, マルチギャップ, 集中巻

Keywords : variable magnetic flux, toroidal winding, self-excited wound-field, reversal magnetic pole, multi-gap, concentrated winding

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, 鉄損増加により高効率化が困難である。

それらの課題に鑑みて, 近年モータ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。代表的な研究として, 磁石式同期モータ (PMSM) の磁石磁力を可変にするメモリモータ方式とロータスキュー角を調整する方式が挙げられる⁽¹⁾⁽²⁾。しかし, 従来技術では前者の場合, 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⁾。

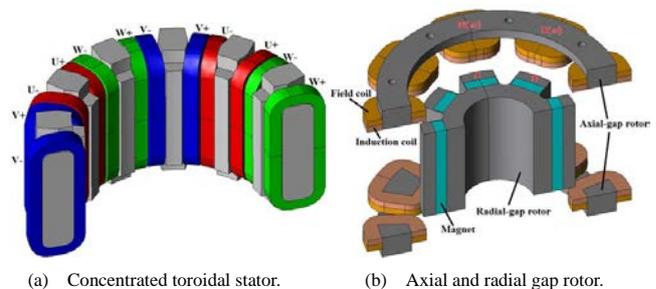


Fig. 1. Proposed variable magnetic flux PM motor.

後者の場合, 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るという問題がある⁽²⁾。

それらに対し, 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極に対して反転 (スキュー電気角 180 deg) した電磁石磁極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⁽³⁾。提案モータは, 誘導機の電磁誘導原理とダイオード整流により得られる界磁電流を利用することで自動的に可変界磁を実現している。現在, 提案モータの自動的な可変界磁動作を検証するために原理検証機の試作を進めている。本稿では, 原理検証用試作機の電磁界解析による磁気回路設計と構造設計について報告する。

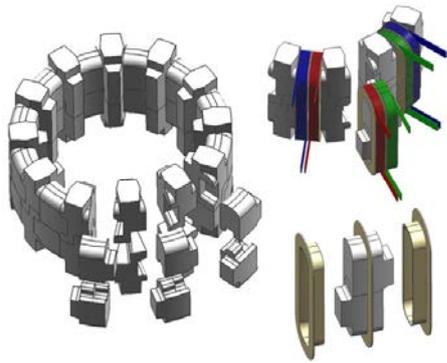
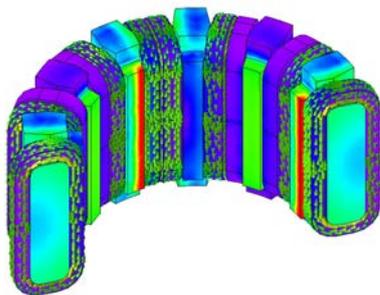
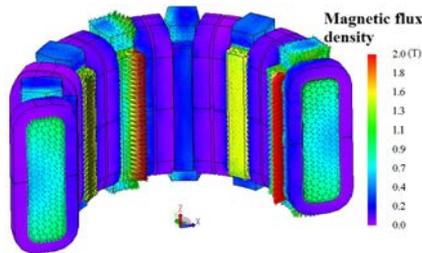


Fig. 2. Segmented stator core and toroidal coils.



(a) Armature current vectors.



(b) Magnetic flux contour and vectors.

Fig. 3. Armature current and magnetic flux vectors.

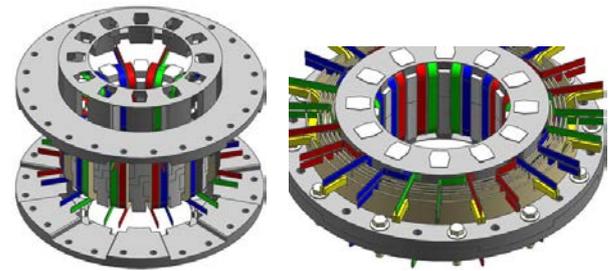
2. 原理検証機の構造

(2.1) モータ全体構造

図 1 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, アキシタルギャップ 2 面に自励式巻線界磁ロータ (SE-WF ロータ) を配置している。PM ロータと SE-WF ロータの磁極配置は電気角で 180 deg 反転させた構造とする。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⁽⁴⁾。

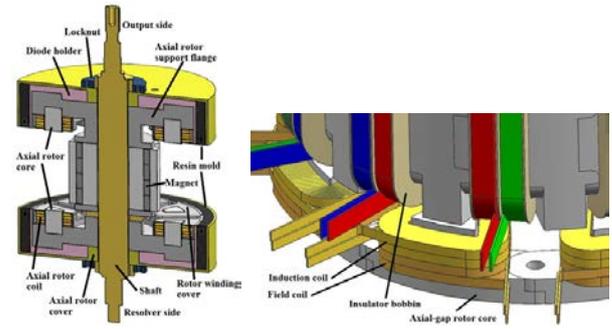
(2.2) ステータ構造

図 2 に集中巻トロイダルステータの構造を示す。コア材質は磁路が 3 次元となるため SMC (ヘガネス製 Somaloy) を用いる。同図に示すようにステータコアは突極部とヨーク部で周方向に 12 分割, 軸方向に 2 分割した構造とし, エッジワイズ巻でプリ成形したトロイダルコイル (18 T) はイ



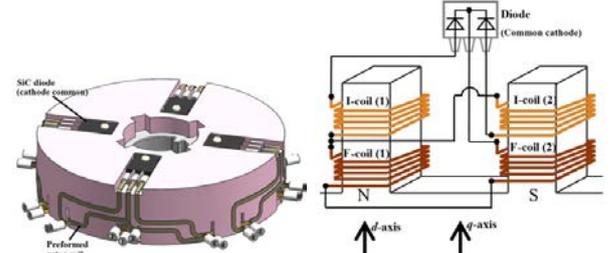
(a) Segmented stator support cover. (b) Armature winding connection.

Fig. 4. Stator support cover and armature winding connection.



(a) Rotor assembly.

(b) Aligned rotor windings.



(c) Mounted diode module on rotor.

(d) Rotor rectifier circuit.

Fig. 5. Rotor configuration of prototype.

ンシュレータ (PPS 製) を介してヨーク部に取付け環状に組上げていく。なお, 100 トンプレス機でコアピースの重量密度が $7.4\sim 7.5 \text{ g/cm}^3$ を満たすよう分割形状で設計している。図 3 に示すように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。コアの保持は図 4(a) に示すステンレス製 (SUS303) の保持部品により軸方向上下から挟み込み, 外周部に設けたボルト穴を使ってハウジングに固定する。結線は図 4(b) に示すバスバーと PPS 製の保護部材を用い, 各相のコイルを 4 並列結線する。結線保護部品は各相のバスバーを隔てるレーンが設けてあり, 結線後にこのレーンの溝を樹脂でモールドすることで結線部の保護, 固定を行う。

(2.3) ロータ構造

図 5 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, ステータコアと同様にコアピースの重量密度が $7.4\sim 7.5 \text{ g/cm}^3$ を満たすように分割形状で設計している。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 5(b) 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

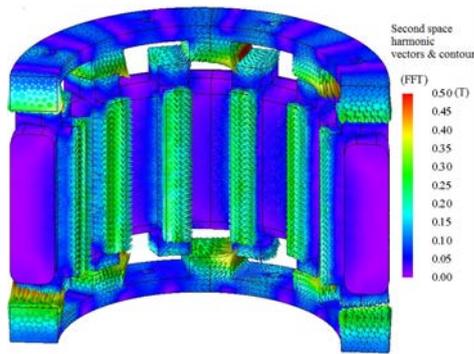
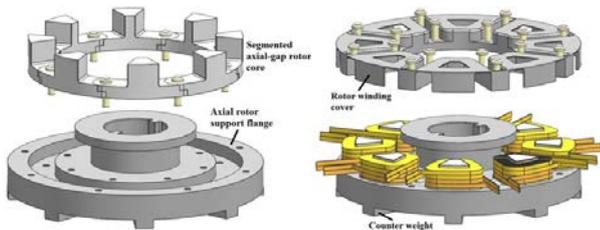


Fig. 6. Second space harmonic vectors and contour.



(a) Segmented axial-gap rotor and its support flange. (b) Rotor winding cover.

Fig. 7. Rotor support flange and winding cover.

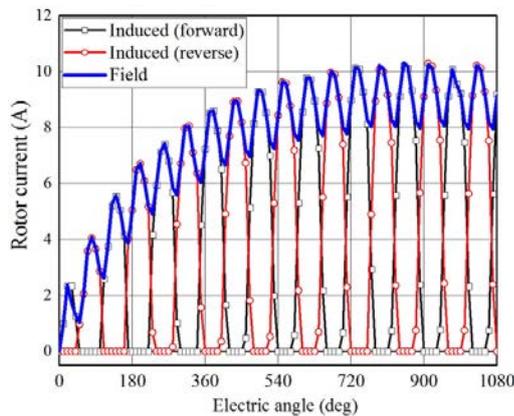


Fig. 8. Rotor currents under 890 A_{rms}T and -20 deg for 2000 r/min.

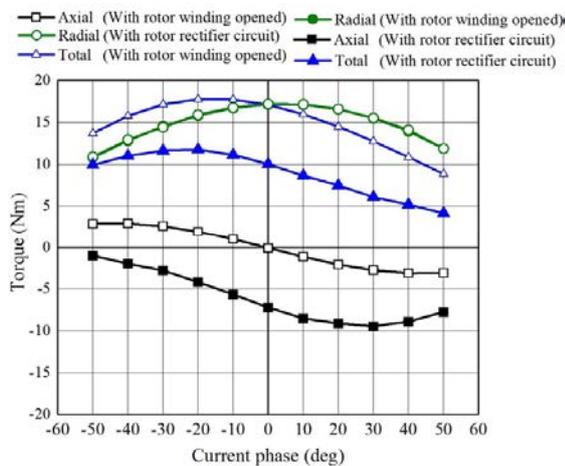


Fig. 9. Current phase vs. torque characteristics under armature magnetomotive force 890 A_{rms}T for 3000 r/min.

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	1272 A _{rms} 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)

5(c)のバックヨーク側に配置した結線基板上的ダイオードと結線し、図 5(d)に示す整流回路を構成する。図 6 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 180 deg 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スキュー電気角 180 deg の反転磁極関係となり自動的に線間電圧を抑制できる。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図 7(a)に示すステンレス製 (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、ロータ巻線の保持には同じく SUS303 製の図 7(b)に示す保護部品により巻線を覆い、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を兼ねた真鍮製カバーを被せた構造とする。アキシャル方向のギャップ管理は図 5(a)に示すように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 SW-WF ロータの隙間嵌め側を取り外しトロイダルステータを組み付けてモータとして完成させることが可能となる。

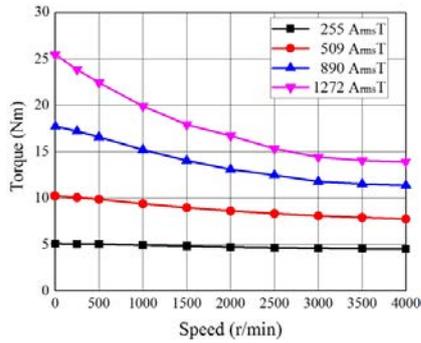


Fig. 10. Adjustable speed drive characteristics.

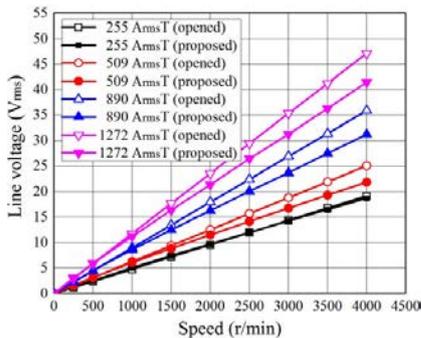


Fig. 11. Armature line voltages with respect to rotation speed increase.

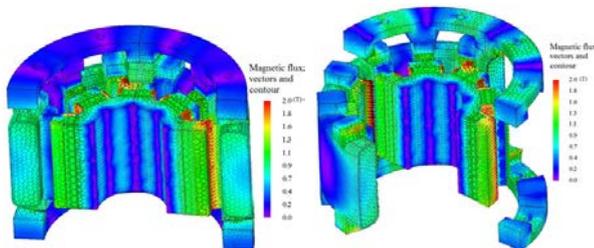


Fig. 12. Magnetic flux density and vectors under 890 Arms T and current phase -20 deg for 2000 r/min.

3. 電磁界解析による性能予測

表 1 に前章の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。図 8 にロータ電流、図 9 に電流位相-トルク特性、図 10 に電機子起磁力 255 Arms T, 509 Arms T, 890 Arms T, 1272 Arms T の励磁条件下における回転速度-トルク特性を示す。図 10 のトルクは PM ロータと SE-WF ロータの総合トルクであり、MTPA 制御時の値である。自動的に可変界磁機能を確認するため 4000 r/min まで電圧制限にかからないように直流バス電圧はモータ線間電圧に対して十分高い値を想定している。図 8 から第 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）による自己励磁動作を確認でき、図 10 からは一定の電機子起磁力条件下においても回転速度の増加と共にトルクが低下していくことが確認できる。これは、図 9 に示すように PM ロータの磁石トルクと SE-WF ロータの電磁石トルクは反転磁極の関係（逆極性）で、PM ロ

ータの起磁力は永久磁石により一定であるが SE-WF ロータの起磁力はファラデーの法則に基づき回転速度の増加と共に大きくなるためである。また、電機子起磁力が大きくなるにつれ第 2 次空間高調波の振幅が増加し SE-WF ロータの電磁石起磁力も増加するため、トルクの低下率が顕著になる。一方で回転速度がゼロ速度や極低速域においては空間高調波による誘導起電力が低いためロータコイルのジュール損で消費され自励式電磁石が形成されない。そのため SE-WF ロータは順突極ロータとしてリラクタンストルクのみが発生するためラジアルギャップ側の PM ロータのトルクと合計して 3 面トルクが活用できトルク密度の向上を実現できる。電機子、永久磁石、自励式電磁石の各起磁力の最適化を行うことで電流位相進角による弱め界磁が必要な駆動領域を狭めることができ、効率向上、可変速特性の拡大を期待できるが今後の課題とする。図 11 に回転速度-線間電圧特性を示す。同図は各電機子起磁力において図 5(d) のダイオード整流回路を構成した場合と開放にした場合の線間電圧を比較した結果を示している。これにより、PM ロータの磁石磁束と SE-WF ロータの自励式電磁石磁束が電機子巻線に対向して鎖交することで電機子に鎖交する磁束量を低減できるため、回転速度の増加と共に誘起電圧を自動的に低減でき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磁気回路と構造設計について検討した。電磁界解析により、集中巻構造で発生する第 2 次空間高調波を反転磁極の界磁エネルギー源として活用し、反転磁極によって電機子巻線に鎖交する磁束量を回転速度の増加とともに自動的に調整可能な自励式弱め界磁制御を実現できることを確認した。さらに、原理検証用試作機の構造設計を行い詳細な各部寸法と部材を決定した。今後は、試作機による原理検証に加えて最適な電氣的スキュー角の検討および各起磁力（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を調整し、モータ仕様に対して電流進角制御による弱め界磁を不要とした可変界磁 PM モータの磁気回路設計に取り組む予定である。

文 献

- (1) 堺・結城・橋場・高橋・安井・ゴウウツェックランシー：「可変磁力メモリモータの原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60 (2011)
- (2) 野中・大賀・大戸：「可変界磁モータの駆動に関する考察」, 電学論 D, Vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015)
- (3) 青山・中島・野口：「電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの提案」, H28 年度電気学会全国大会, No. 5-042, pp. 77-78 (2016)
- (4) 青山・野口：「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ形磁石フリーモータの実機検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015)