

自励式巻線界磁形マルチギャップモータの磁気回路検討

青山 真大 中島 一清* (スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Magnetic Circuit Design of Self-Excited Wound-Field-Type Multi-Gap Motor
Masahiro Aoyama, Kazukiyo Nakajima* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a self-excited wound-field synchronous motor in which space harmonic power is utilized for the field magnetization instead of permanent magnets. The stator has a toroidally-concentrated winding structure, and the torque generation surface and induced voltage generation surface are composed of three air-gaps. The rotor coil is preformed in three-dimensional shape, and the number of the diode for rotor winding rectifier circuit does not increase even though the number of air-gaps increase. In addition, the rotor magnetomotive force is not separated, i.e., the armature ampere turn does not change even though the air-gaps increase because of the rotor coil is not divided. The most suitable multi-gap magnetic circuit is investigated through the magnetic field analysis. Furthermore, the adjustable speed drive characteristics are clarified.

キーワード：自励式巻線界磁，トロイダル巻，ダイオード整流，マルチギャップ，集中巻

(Keyword: self-excited wound-field, toroidal winding, diode rectifier, multi-gaps, concentrated winding)

1. はじめに

近年、欧州をはじめとした主要国における 2020 年の燃費規制を達成するために自動車の電動化が急激に促進されている。2011 年にドイツの自動車メーカー 5 社が 48 V 電源規格「LV148」を策定し実用化に向けて技術開発が進められている⁽¹⁾。48V システムは高電圧のフルハイブリッドシステム（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。さらに 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。

今日、48 V の HEV システムとしては既存の 12 V 系で補機を駆動するシステムに 48V 電源を使ったベルト駆動のオルタネータ/モータ（BAS システム）で、回生やアシスト効果をもつマイルド HEV システムを DC/DC コンバータを介して組み合わせる方式が盛んに検討されている⁽²⁾。モータ出力としては 5~10 kW 程度がターゲットとなっているが 48 V と低電圧駆動のためブラシを介して可変界磁可能なクローポール形オルタネータが BAS システムの主流として検討されている。その他、米国で誘導電動機（IM）も BAS システム用モータとして検討されている⁽³⁾。一方で、クローポール形オルタネータの場合、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磨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、誘導性のため効率と力率が低いという問題がある。これらの問題に対して、筆者らは既に IM の電磁誘導原理を応用したダイオード整流による自励式巻線界磁形同期モータを提案した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。小型高トルク化のアプローチとしてバックヨークレス構造のステータの両面を巻線界磁ロータで挟み込むパンケーキアキシャルギャップ構造にすることで、両面で自励界磁エネルギー源となる空間高調波をロータに鎖交させ、両面でトルクを発生できる構造としていた点に特長がある⁽⁵⁾。しかし、過去の検討よりバックヨークレス構造とすることでステータの機械強度が低下し電磁吸引力により大出力化が困難であるという問題と、ダブルロータ構造のため同じ体積で考えた場合、アンペアターンが 1/2 に分割されてしまいロータ起磁力が低下する問題が明らかになった⁽⁵⁾。さらに整流回路がセグメント構造のため整流用ダイオードが 2 倍になりコストが増加する問題があった⁽⁵⁾。

本論文では上記の課題に鑑みて、集中巻トロイダルステータの 3 面を活用して、3 面で発生する漏れ磁束をロータに鎖交させて自励し、3 面でトルクを発生させるマルチギャップモータを提案する。ロータ巻線はアキシャル面のロータとラジアル面のロータで直列接続し、アンペアターンが分割されることを防ぎ、整流用素子数も従来のラジアルギャップ形と変わらない構造とした。同じコア外径、積厚で 3

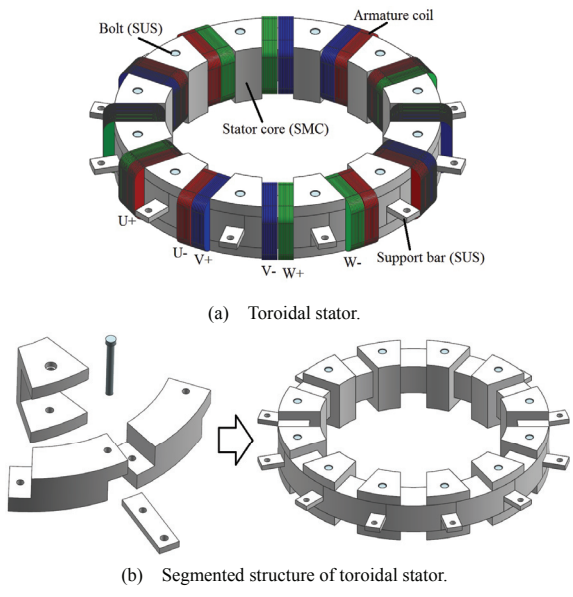


図1 トロイダル巻ステータ構造
Fig. 1. Toroidal stator.

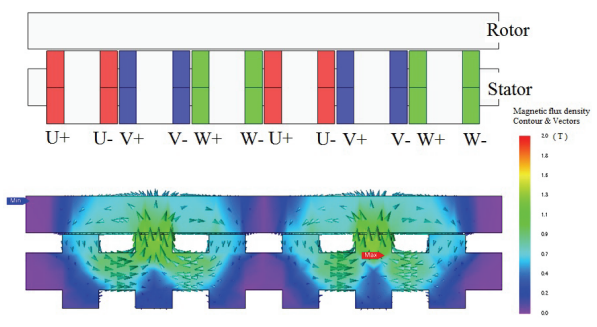


図2 集中巻トロイダルステータの磁束ベクトル
Fig. 2. Magnetic flux vectors of toroidally concentrated winding stator.

タイプのマルチギャップ構造を設計し、電機子起磁力とロータアンペアターンも同じになるように設計することで自励式巻線界磁形マルチギャップモータとして適した磁気回路構造を電磁界解析により検討したので報告する。

2. 3タイプのマルチギャップモータの構造

〈2・1〉ステータ構造 図1に集中巻トロイダルステータ(ボビン形用)を示す。平角線をエッジワイズ巻で成形し、図1(b)に示す分割ステータに嵌めこみながら組立てることで占積率の向上が可能な構造で検討している。三次元磁路となるためステータコアはSMC(ヘガネス製 Somaloy)を用いる。図2に集中巻トロイダルステータの磁束ベクトルを示す。同図にはV相電流が最大のタイミング(V相電流を1.0としたとき、U相とW相電流がともに-0.5)における磁束ベクトルを示している。同図はトロイダルステータの1面にロータを配置した場合であるが、さらに2面にロータを配置することで3面に3次元的な磁路を形成することができる。残り1面はハウジングに取り付ける面とする。磁束ベクトルからわかるように集中巻トロイダルステータ

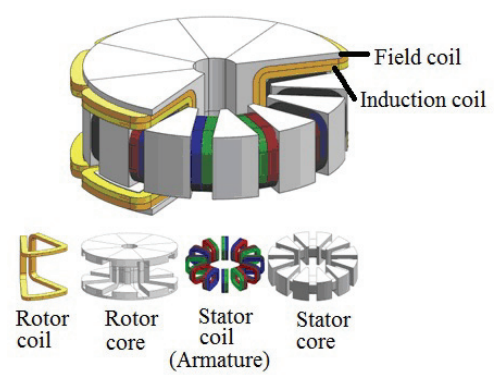


図3 ボビンタイプのマルチギャップモータ
Fig. 3. Multi-gap motor (Bobbin-type).

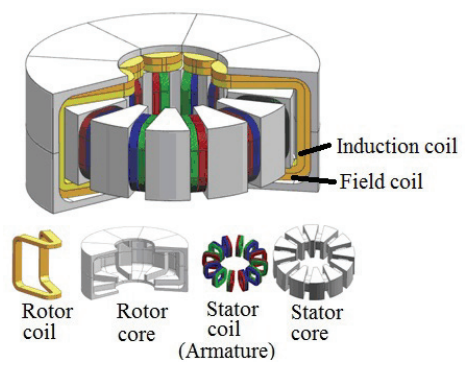


図4 シェルタイプのマルチギャップモータ
Fig. 4. Multi-gap motor (Shell-type).

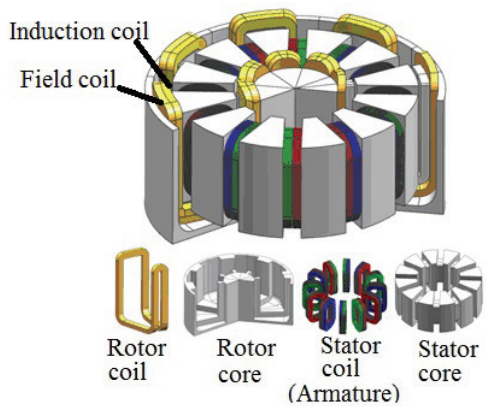


図5 カップタイプのマルチギャップモータ
Fig. 5. Multi-gap motor (Cup-type).

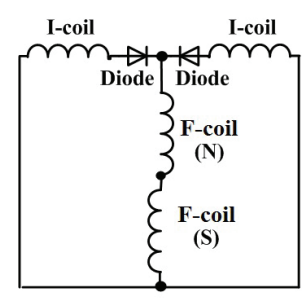


図6 ロータ巻線整流回路
Fig. 6. Rotor winding rectifier circuit.

は同相の電機子磁束を対向させてギャップ中に電機子起磁力を発生させるため、多面ギャップ構造のモータに適したステータ構造である⁽⁶⁾。

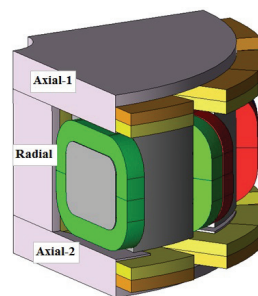
〈2・2〉 3 タイプのモータ 図3～図5に3タイプのマルチギャップモータを示す。それぞれ図3をボビン形、図4をシェル形、図5をカップ形と呼称する。3タイプともにコア外径を $\phi 120$ とし、コア軸長をL51.8で共通としている。最大電機子起磁力が1170 A_{rms}T（電流密度25 A_{rms}/mm²）となるように3タイプでアスペクト比を変更しながらステータ設計を行っている。3タイプともに電機子巻線は5.26 mm×0.56 mmの平角銅線（絶縁皮膜込み）を用いてエッジワイズ巻で18 T/tooth/phaseとしている。ボビン形はコア軸長51.8 mmの制約から扁平形のステータ構造となり、カップ形はラジアルギャップ面にインナーロータとアウターロータがあるため軸方向に長いステータ構造となっている。ロータ巻線は3タイプともに1.57 mm×0.47 mmの平角銅線（絶縁皮膜込み）を32 T/toothでフラットワイズ巻（ α 巻）している。誘導コイルと界磁コイルともに同じ断面積のコイルを50:50のターン数比で巻いており、1極分で図6に示すような全波整流回路を構成している。図示していないが、整流回路はロータ上にマウントした結線基板によって実装する。ロータコアにおける磁路も三次元磁路となるため、SMCコアを用いる必要がある。詳細な構造設計は検討中であるが、ロータコアは必要に応じて組立性を考慮し、分割コアで設計する予定である。表1に原理検証用に試作検討しているモータの主要諸元を示す。

3. 電磁界解析による性能比較

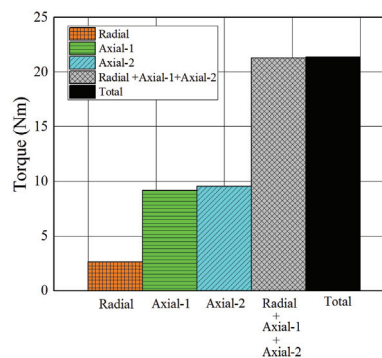
〈3・1〉 各面のトルク割合分析 図3～図5の3タイプにおいてトロイダル巻ステータの3面のトルク割合分析を行い、各モデルの性能比較を行う。3タイプのトルク発生面をそれぞれラジアル面とアキシャル面で3分割し、1面以外の残りの2面の材料をSMCコアから空気に置き換えて3つのトルク発生面についてトルク寄与度を分析する。図7～図9に3タイプにおいて、回転速度2000 r/min、電機子起磁力1170 A_{rms}T、電流位相角65 degの条件にて電流源で電磁界解析（有限要素法）によりトルク（定常状態の平均値）を求めた結果を示す。なお、メッシュ要素数はほぼ同等となるようにモデリングし、ステップ数も揃えて解析している。同図においてTotalは3面を全てSMCコア材料で解析したときの総合トルクであり、足し算表記は3面を独立に計算した結果の和（SUM）を示している。図7～図9より、Totalで比較するとボビン形が最もトルクが高いことがわかる。構造的な観点から3タイプを比較すると、シェル形の場合、限られたスペースの中で1170 A_{rms}Tの電機子起磁力を実現するためにトロイダル巻ステータの内径側のコアスペースに余裕がない。加えて、ステータを保持する面がステータ内径部分になるため、構造的にもトルクを高く設計することが困難であるといえる。カップ形の場合、ラジアルギャップ面にインナーロータとアウターロータが配置される構

表1 提案する3タイプのモータ主要諸元
Table I Specifications of proposed three-type motors.

| | |
|--|---|
| Number of rotor poles | 8 |
| Number of stator slots | 12 |
| Motor core outer diameter | 120 mm |
| Air-gap length | 1.0 mm |
| Axial length of core | 51.8 mm |
| Maximum magnetomotive force | 1170 A _{rms} T |
| Number of stator coil-turn | 18 |
| Armature winding connection | 4 series |
| Number of rotor induction coil | 32 |
| Number of rotor field coil | 32 |
| Armature coil size (with insulating coating) | 5.26 mm×0.56 mm |
| Rotor coil size (with insulating coating) | 1.57 mm×0.47 mm |
| Turn ratio of induction coil and field coil | 50 : 50 |
| Core material | SMC (somaloy prototyping material by Hoganas) |



(a) Three-torque generation areas of bobbin type



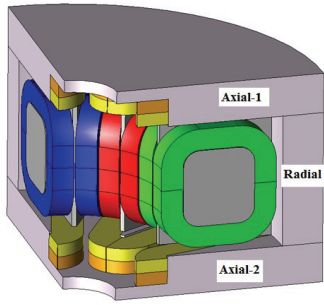
(b) Torque analysis of three-torque generation area.

図7 トルク発生面の分離（ボビンタイプ）

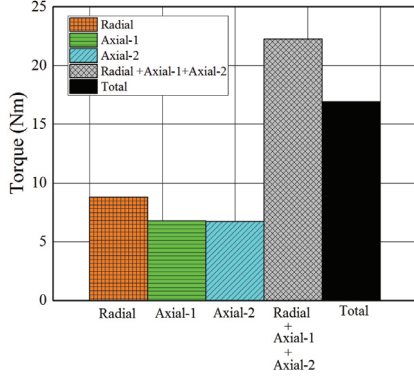
Fig. 7. Separation of torque generation area (Bobbin type).

造となるため、軸方向に長いトロイダル巻ステータ構造となる。そのため、アキシャルギャップのトルク発生面が減少し、ラジアルギャップ面のインナーロータ側もトルク発生面が減少することで他の2タイプに対してトルクが低くなる。さらにシェル形とカップ形ともにステータの冷却が困難な構造であり、連続定格性能がボビン形よりも低下することが考えられる。

次に、ボビン形はTotalとSUMの結果に大きな差がないのに対して、シェル形とカップ形はともにSUMよりもTotalの方が低い。トロイダル巻ステータのラジアルギャップの



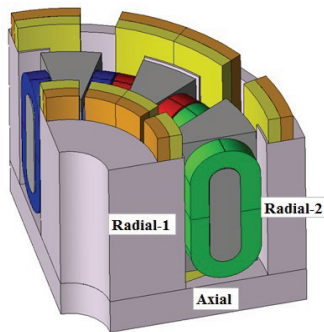
(a) Three-torque generation areas of shell-type.



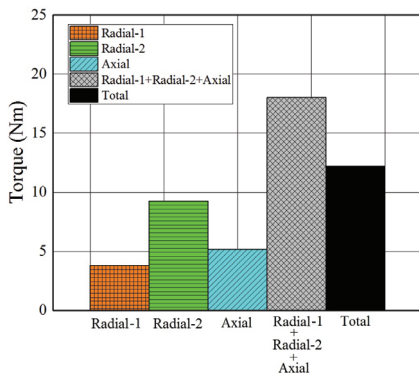
(b) Torque analysis of three-torque generation area.

図8 トルク発生面の分離 (シェルタイプ)

Fig. 8. Separation of torque generation area (Shell type).



(a) Three-torque generation areas of cup-type.

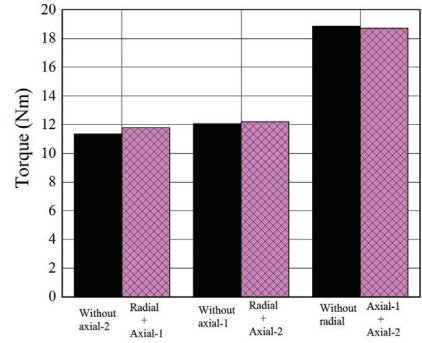


(b) Torque analysis of three-torque generation area.

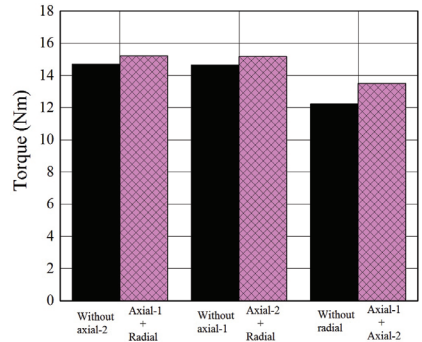
図9 トルク発生面の分離 (カップタイプ)

Fig. 9. Separation of torque generation area (Cup type).

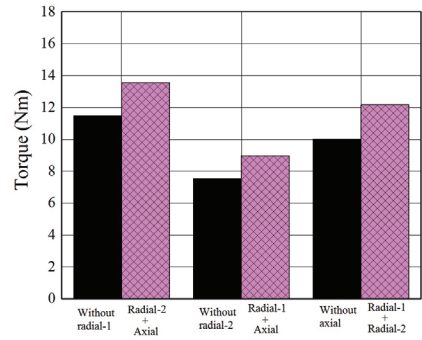
アウター側の面をトルク発生面に利用する場合、パーミアンス変動が大きいため、ラジアルギャップ面からアキシヤ



(a) Bobbin type.



(b) Shell type.



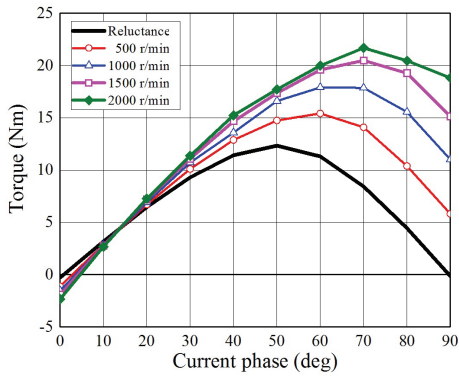
(c) Cup type.

図10 面間の漏れ磁束検証

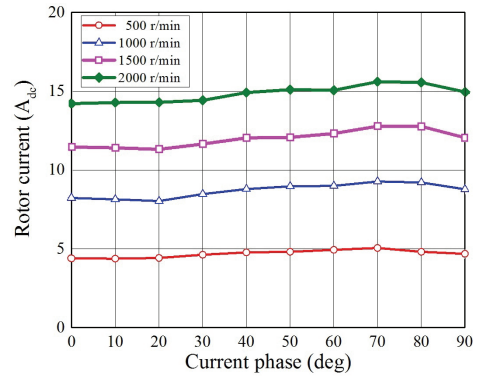
Fig. 10. Verification of leakage magnetic flux.

ルギャップ面に鎖交する軸方向の主磁束の漏れが増加することが懸念される。図10に主磁束の漏れを検証するために、図7~図9の各モデルの3面のうち、2面の材料をSMCのまま残し、残り1面を空気として解析した結果 (without表記) と図7~図9で3面独立計算した結果から2面の和を求めた結果比較を示す。同図より、トロイダル巻ステータのアウター側の面をトルク発生面に利用するシェル形とカップ形は主磁束の漏れの影響が大きいことを確認できる。主磁束の軸方向の漏れは電機子巻線に鎖交しない閉磁路となり、トルク発生に寄与しない。アスペクト比によって主磁束の漏れ量に変化するが、ボビン形が最も主磁束が漏れにくい構造であることが確認できる。

〈3・2〉可変速トルク特性 3タイプの可変速トルク特性と界磁電流特性を電磁界解析により比較した結果を図11~図13に示す。各図より、ボビン形のリラクタンストルクが



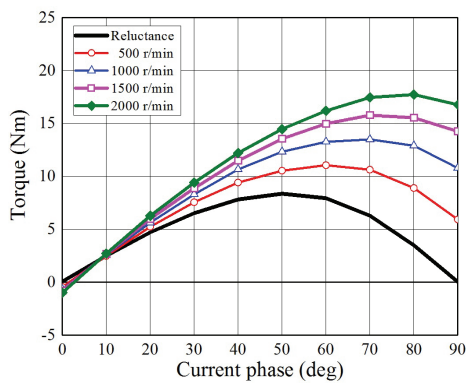
(a) Torque characteristics.



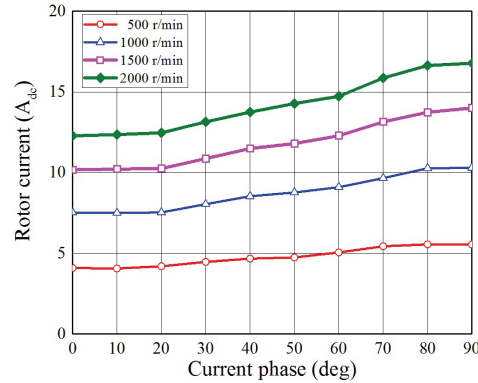
(b) Rotor field current (average).

図 11 可変速トルク特性 (ボビンタイプ)

Fig. 11. Adjustable speed drive characteristics with respect to current phase (Bobbin type).



(a) Torque characteristics.



(b) Rotor field current (average).

図 12 可変速トルク特性 (シェルタイプ)

Fig. 12. Adjustable speed drive characteristics with respect to current phase (Shell type).

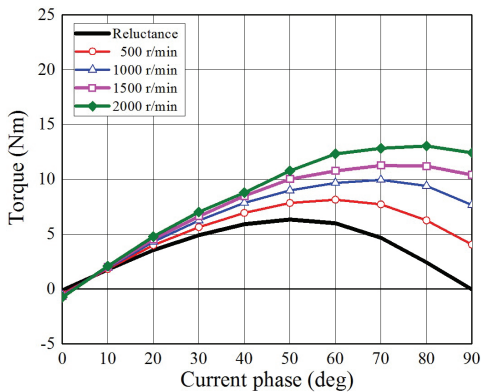
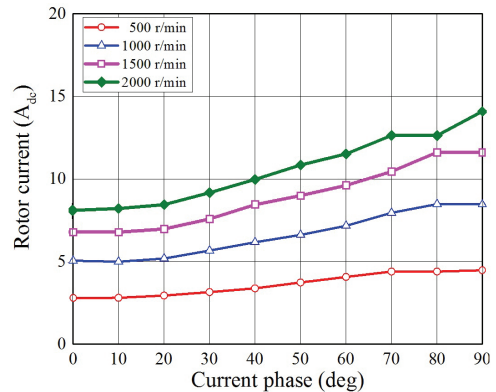


図 13 可変速トルク特性 (カップタイプ)

Fig. 13. Adjustable speed drive characteristics with respect to current phase (Cup type).

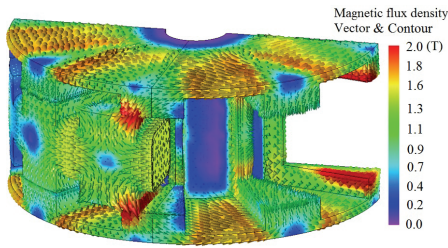


最も大きく、電磁石トルクも加わった可変速トルク特性が優れていることが確認できる。シェル形とカップ形の場合、先に述べたようにトロイダル巻ステータの OUTER 側の面のパーミアンス変動が大きいためトルクリプルが増加し、平均トルクの低下を招く。一方で界磁電流特性はシェル形に電流位相依存特性の傾向が見られるが、MTPA 点においてはボビン形よりも界磁電流値が大きい。これはパーミアンス変動が大きくなるアキシヤルギャップ面とアウターラジアルギャップ面で界磁エネルギー源となる第 2 次空間高調

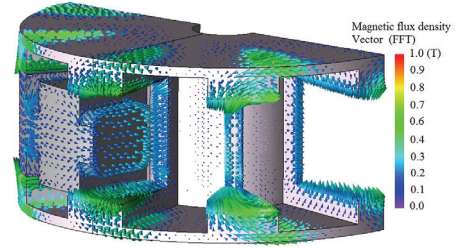
波を効率的に鎖交できているからだと推察できる。図 14～図 16 に 2000 r/min, MTPA 点における磁束密度分布と第 2 次空間高調波（基本波同期回転座標上における第 3 次時間高調波）の磁束ベクトルを示す。同図より、ボビン形が特にアキシヤル面で大きなトルクを発生できていることを磁束ベクトルから確認できる。

4. まとめ

本稿では、機械強度の向上とロータ巻線アンペアターン



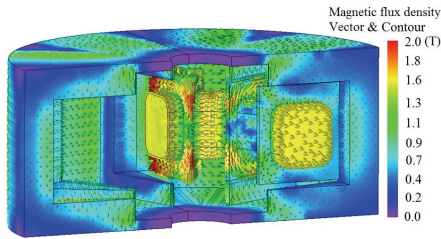
(a) Magnetic flux density and vectors.



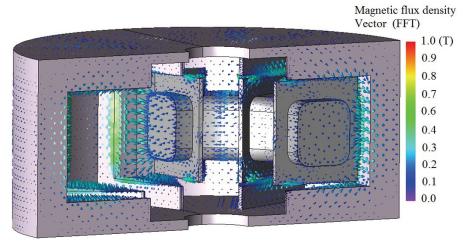
(b) Second space harmonic vector (Third time harmonic).

図 14 磁束密度分布 (ボビンタイプ)

Fig. 14. Magnetic flux density distribution (Bobbin type).



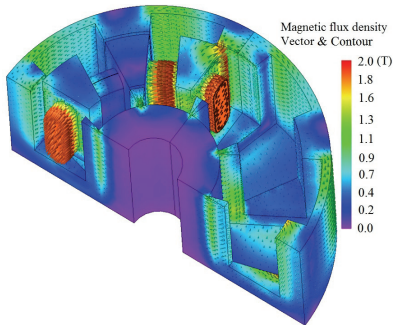
(a) Magnetic flux density and vectors.



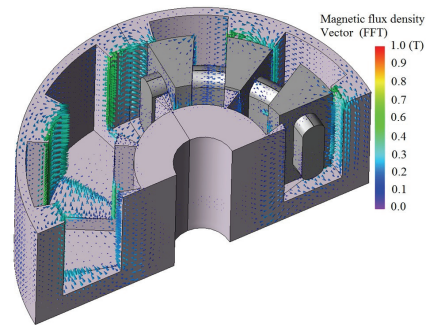
(b) Second space harmonic vector (Third time harmonic).

図 15 磁束密度分布 (シェルタイプ)

Fig. 15. Magnetic flux density distribution (Shell type).



(a) Magnetic flux density and vectors.



(b) Second space harmonic vector (Third time harmonic).

図 16 磁束密度分布 (カップタイプ)

Fig. 16. Magnetic flux density distribution (Cup type).

の分散化によるロータ起磁力の低下防止を目的に、集中巻トロイダルステータを用いて 3 面で発生する漏れ磁束をロータに鎖交させて自励し、3 面でトルクを発生させるマルチギャップモータを提案した。電磁界解析による検討の結果、同じコア外径と積厚且つ、電機子起磁力とロータコイルターン数が等しくなるように設計した条件下では、ボビン形構造が提案モータの磁気回路としてトルク密度が最も高くなることを明らかにした。今後は、ボビン形の詳細な磁気回路設計と構造設計を進め、実機試作評価により可変速トルク特性の検証と効率特性を明らかにする予定である。

文 献

- (1) CPT HP: "European auto industry embracing 48V hybrid", <http://www.cpowert.com/European-auto-industry-embracing-48V-hybrids>
- (2) Ulf Stenzel: "48V Mild Hybrid Systems Market Needs and Technical Solutions", AVL UK Expo 2014.

<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs101-120.html>

- (3) M. Shiga, T. Morinaga, and K. Takano: "Development of BAS Hybrid System Delivered for GM Corporation", Hitachi Review, p. 20, (2007-1)
- (4) 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. IA*, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015)
- (5) M. Aoyama, T. Noguchi, and S. Ri: "Preliminary Experimental Verification of Pancake-Type Axial-Air-Gap Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Double Sided Space Harmonics", *IEEE Industry Applications Society Conference*, No. 3-23 (2015)
- (6) M. Namba, K. Hiramoto, H. Nakai: "VVerification of the Principle of a Novel Variable-Field Motor with Toroidally-Wound Windings", *IEEE Technical Meeting*, RM-14, pp. 103-108 (2014)