

空間高調波を利用した 補極付ラジアルエアギャップ形磁石フリーモータの実機検証

正員 青山 真大^{*,**a)} 正員 野口 季彦^{*}

Experimental Verification of Radial-Air-Gap-Type Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles

Masahiro Aoyama^{*,**a)}, Member, Toshihiko Noguchi^{*}, Member

(2015年2月21日受付, 2015年4月5日再受付)

This paper describes a synchronous motor in which space harmonic power is utilized for the field magnetization instead of permanent magnets. The stator has a concentrated winding structure, and the rotor has two different types of windings, i.e., an induction pole (I-pole) winding that primarily retrieves the second space harmonic and an excitation pole (E-pole) winding for the field magnetization. The two coils are connected via a center-tapped full-bridge diode-rectifying circuit. The adjustable-speed drive characteristics and efficiency map are experimentally verified with a prototype motor. In addition, it is experimentally clarified that the field magnet function of the self-excited electromagnet pole has passive variability with respect to the armature current, the rotation speed, the phase angle, and the time harmonics superimposed on the phase current. Furthermore, the drive performance of the proposed motor is studied by comparing the torque and efficiency characteristics.

キーワード：同期モータ, 自己励磁, 空間高調波, 誘導電流, レアアースフリーモータ, 集中巻

Keywords: synchronous motor, self-excitation, space harmonics, induced current, rare-earth-free motor, concentrated winding

1. 緒言

近年, 車両のハイブリッドシステムとして 48 V のローエンドなものから数百 V の二次電池を用いて電動化率を高めた高効率パワートレイン技術まで, 様々なポートフォリオが検討されている^{(1)~(3)}。そのシステムを構成する電気-機械エネルギー変換装置として, 専ら高効率な埋め込み永久磁石同期モータ (IPMSM) が用いられている⁽⁴⁾。それらに用いられる磁石は, 小型化, 高エネルギー密度化の要求から残

留磁束密度が高く, 耐熱性を確保できる Dy や Tb を添加した高価なネオジム磁石が一般的である⁽²⁾⁽⁵⁾。しかし, Dy や Tb といった重希土類は産地が偏在しており枯渇の懸念があるだけでなく, 今後のハイブリッド自動車 (HEV) の普及によって PMSM の生産台数が増加すると資源供給の不安定性が益々顕在化すると考えられる。そのようなコストと資源供給面の懸念に対して, 磁石フリーモータの可能性として, 集中巻ステータにおいてロータ損失増加の主要因の一つである第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源に活用した自励式巻線界磁モータが提案されている^{(6)~(18)}。この種のモータは相互インダクタンスを介した電磁誘導現象を利用して界磁をつくるとともにトルクを出力するため, ステータとロータ間の結合係数を如何に向上させるかが重要である。そのため, 筆者らは Fig. 1(a) のモデルに対して, 突極間に補極を配置した Fig. 1(b) のモデルを提案してきた^{(15)~(17)}。これらの新しい自己励磁技術は過去に提案されてきた技術に対してダイオード整流の基本原理は共通であるが, ステータ側に補助巻線が不要となることやリラクタンストルクが利用でき且つ, ロータ内に内包する銅の割合を削減することでスペース的に多極化による高トルク化が期待できる^{(19)~(26)}。

本稿では, 提案モータの自己励磁動作を検証するために

a) Correspondence to: Masahiro Aoyama. E-mail: aoyamam@hhq.suzuki.co.jp

* 静岡大学 創造科学技術大学院
〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

** スズキ (株) 四輪電動車・システム設計部
〒432-8611 静岡県浜松市南区高塚町 300
Suzuki Motor Corporation, Electric Vehicle & System Department
300, Takatsuka-cho, Minami-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8611, Japan

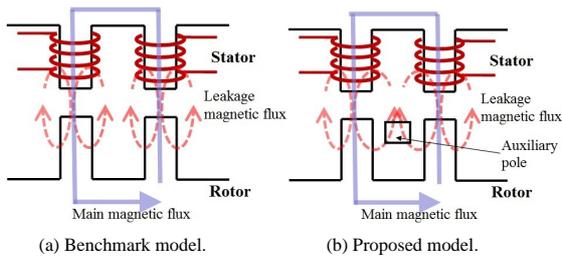


Fig. 1. Main magnetic flux path and leakage magnetic flux path.

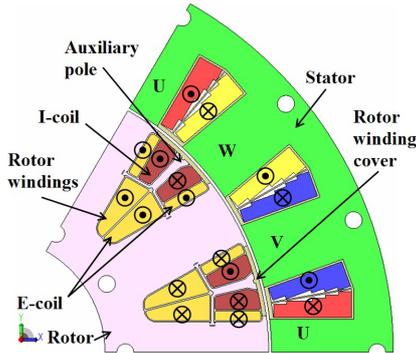


Fig. 2. Cross section (Circumferential direction: 1/6).

原理検証用モータの試作を行い、実際の運転特性を明らかにしたので報告する。

2. 提案するモータの設計と試作機

(2・1) 提案する自励式巻線界磁形同期モータの構造

Fig. 2 に示すように提案するモータは三相 18 スロットを有する集中巻ステータと、12 極の突極を有するロータ構造を採用している。ロータコイルは q 軸高調波磁束を鎖交させて誘導起電力を生じさせるコイル (以下、I-pole) と、 d 軸高調波磁束を鎖交させて誘導起電力を生じさせつつ電磁石を形成するコイル (以下、E-pole) の 2 種類のコイルを有する。ロータ突極部に集中巻で E-pole を配置し、I-pole をロータ突極間に補極として配置する構造とすることで、効率良く空間高調波から界磁を形成する⁽¹⁷⁾。補極は Y 字形形状の積層電磁鋼板 (新日鉄製 30DH) で突極部分に対してクサビ形状に取り付けられている。磁氣的に遮蔽した配置とすることで、突極比の低下を防ぎながら従来技術 (ベンチマーク) では d 軸高調波磁束のみを界磁エネルギー源として利用していたのに対して、提案するモータは d 軸と q 軸に重畳する空間高調波磁束を効率的に界磁エネルギー源として利用する点に特長がある⁽⁸⁾⁽¹⁷⁾。また、Fig. 3 に示すように I-pole と E-pole の両コイルは全波整流回路で接続されており、界磁電流を増加させるとともに界磁電流リップルを低減して低トルクリプル化を実現している。

(2・2) ロータ巻線の結線と誘導起電力 Fig. 4 にロータ突極に巻いたコイル (E-coil) と補極に巻いたコイル (I-coil) を開放状態にした図を示す。Fig. 4 の各コイルに発生する誘導起電力波形は、電流位相 0 deg (d 軸基準) のと

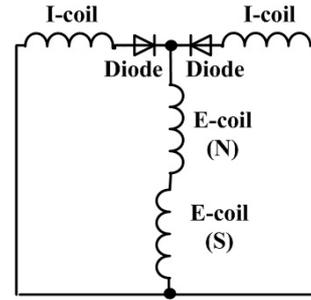


Fig. 3. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.

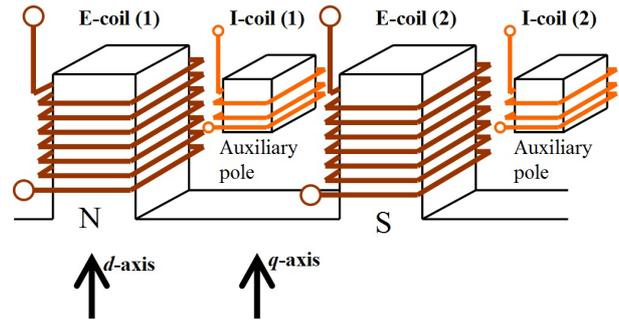
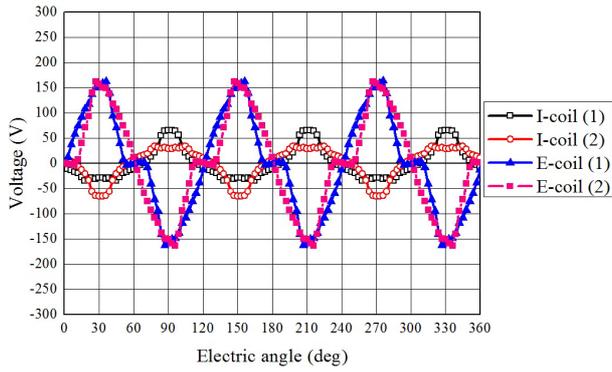


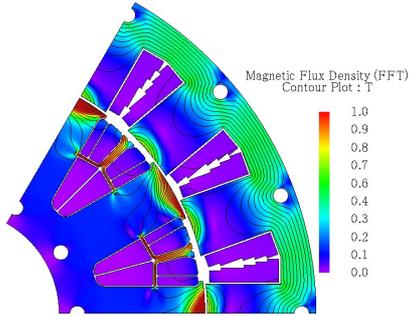
Fig. 4. Opened rotor winding diagram.

き Fig. 5(a) に示す通りとなる。このとき Fig. 5(b) に示すように第 2 次空間高調波 (基本波同期回転座標系における第 3 次時間高調波) はステータティースとロータティースの先端を横切るような磁路となる。一方、補極には直交して鎖交する。このような磁路を形成する第 2 次空間高調波磁束分布は基本波回転磁界に対して逆相で 2 倍周波数の回転磁界となる。電流位相 0 deg のときは I-coil と E-coil ともに比較的正弦波に近い誘導起電力が発生している。参考に Fig. 5(c) に第 6 次時間高調波の磁束密度分布を示す。

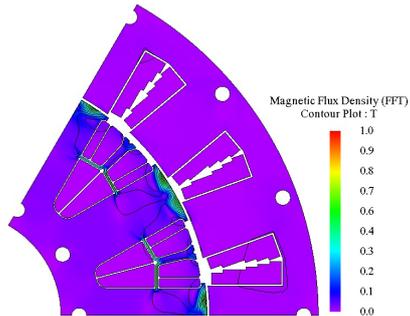
ここで、第 2 次空間高調波が基本波回転磁界に対して逆相となる理由について述べる。Fig. 6 に示すような一般的な集中巻と分布巻の構造を一例に考える。説明の簡単化のためにソリッドロータを用いて各相の自己インダクタンスは一定で変動しないものとし、相互インダクタンスや漏れインダクタンスは無視する。Fig. 6 から分かるように集中巻ステータの各相電機子磁束で発生した磁束は干渉せずに空間的に発生するが、分布巻ステータの各相電機子巻線で発生した磁束は三相が干渉して空間的に発生する。一例として Fig. 7 の三相電機子電流のタイミング T における空間的な磁束分布は Fig. 8(a) のようになる。Fig. 8(a) を調波解析した結果が Fig. 8(b) となる。Fig. 9 は調波解析結果から基本波と 2 倍調波のみを用いて、Fig. 8 の集中巻における空間的な磁束分布を近似表現した図である。各図より、集中巻ステータ構造に起因して発生する第 2 次空間高調波が基本波に対して逆相になることが分かる。この空間的な磁束分布は Fig. 7 の三相電流のタイミングの変化に従って時間的に変化していくため、すなわち基本波回転磁界に対して第 2 次空間高調波は逆相回転磁界になることが分かる。



(a) Induced voltage on rotor windings.



(b) Third time harmonic density and flux lines.



(c) Sixth time harmonic density and flux lines.

Fig. 5. Simulation results under $1686 A_{rms} T$, and current phase 0 deg for 1000 r/min.

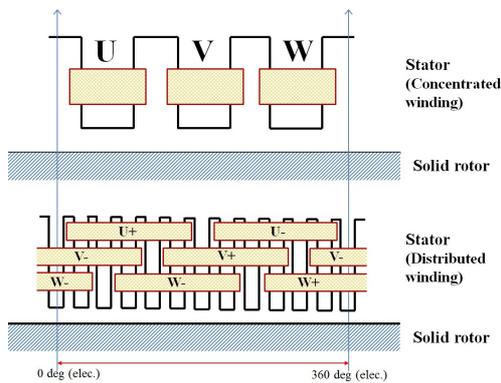


Fig. 6. Concentrated winding and Distributed winding structure.

次に整流回路の構成について、E-coil は電磁石の役割も兼ねるために互いに逆巻き方向となるように結線し、E-coil と I-coil がお互いのコイル間で磁気干渉しないよう誘導起電力位相を考慮して Fig. 10 のように全波整流回路結線をす

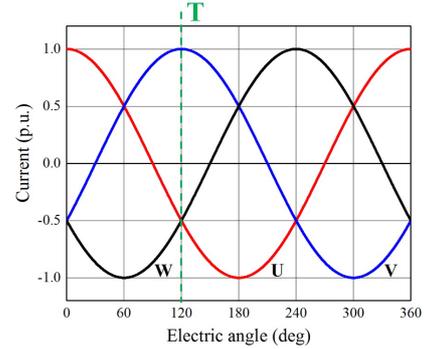
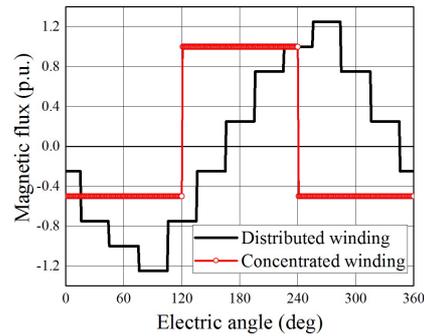
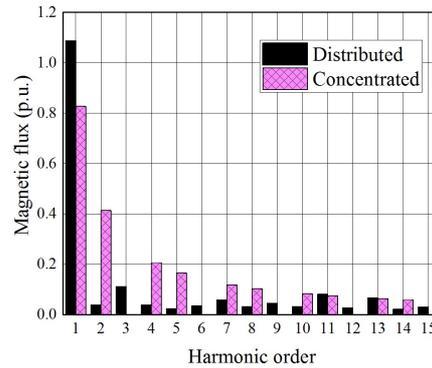


Fig. 7. Three-phase armature currents.



(a) Magnetic flux waveforms around air-gap at moment T in Fig. 7.



(b) Harmonic contents of magnetic flux.

Fig. 8. Magnetic flux waveforms in air-gap at moment T in Fig. 7 and its harmonic contents.

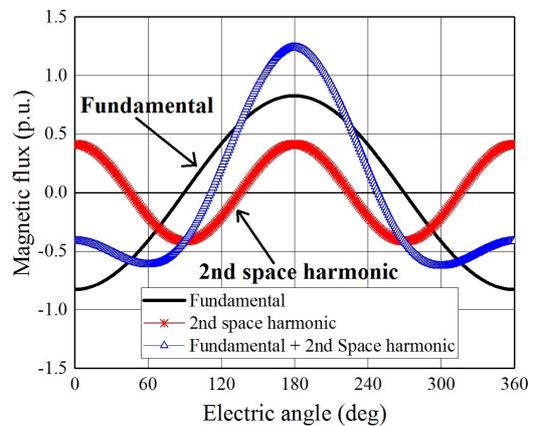


Fig. 9. Approximated magnetic flux waveform in air-gap of concentrated winding.

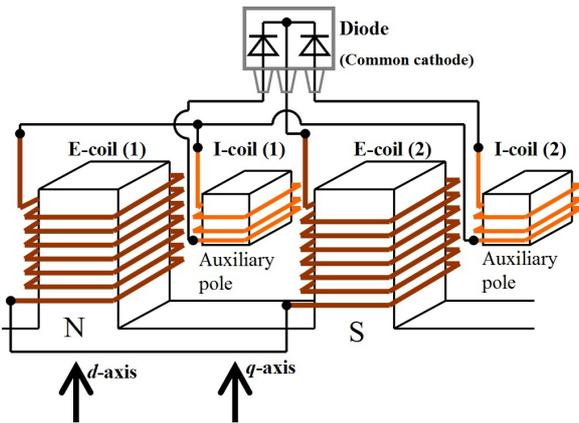
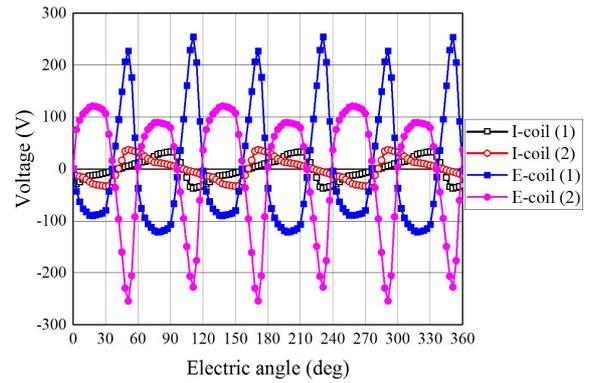
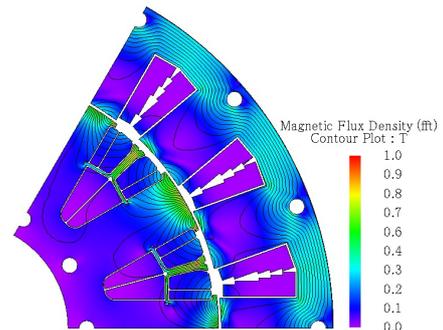


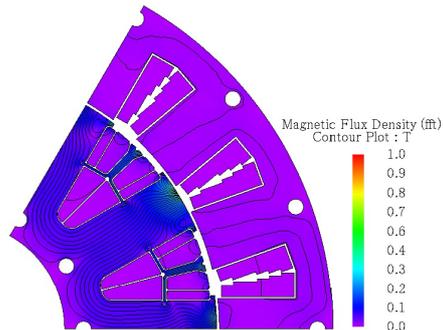
Fig. 10. Rotor winding connection diagram.



(a) Induced voltage on rotor windings.



(b) Third time harmonic density and flux lines.



(c) Sixth time harmonic density and flux lines.

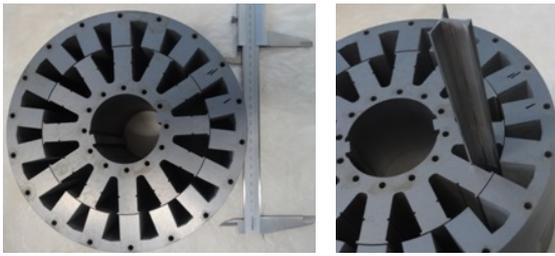
Fig. 11. Simulation results under 1686 A_{rms}T, and current phase 70 deg for 1000 r/min.

る。これにより I-coil に鎖交する q 軸第 3 次時間高調波と E-coil に鎖交する d 軸第 3 次時間高調波を界磁エネルギー源として活用することができる。次に, Fig. 11(a) に電流位相を進角 (70 deg) させたときの各ロータコイルの誘導起電力波形を示し, Fig. 11(b) と (c) に第 3 次時間高調波と第 6 次時間高調波の磁束密度分布を示す。Fig. 5(a) と Fig. 11(a) を比較すると, 電流位相角を進角させた場合, すなわち q 軸電流が増加すると I-coil の誘導起電力に重畳する第 6 次時間高調波は若干量増加しているが, 第 3 次時間高調波は依然として大きい。一方, E-coil の誘導起電力は第 3 次時間高調波よりも第 6 次時間高調波の重畳量が増加している。Fig. 5(c) と Fig. 11(c) の第 6 次時間高調波の磁束密度分布を比較すると, 電流位相角が 0 deg のときは第 6 次時間高調波がロータティースの先端にだけ鎖交しているのに対して電流位相角が 70 deg のときはロータティースの内部深くまで鎖交していることが確認できる。この結果, 高調波磁束の振幅は第 3 次よりも第 6 次のほうが小さいが, 第 6 次は周波数が高いため電流位相角が 70 deg のときは突極に巻かれた E-coil の誘導起電力に重畳する第 6 次時間高調波が増加している。その結果, Fig. 10 の整流回路により E-coil の誘導起電力は半波整流波形に近くなり, 大きく脈動するが I-coil の誘導起電力により電圧脈動を低減することができる。すなわち, 補極により q 軸高調波磁束も界磁に活用することができる。

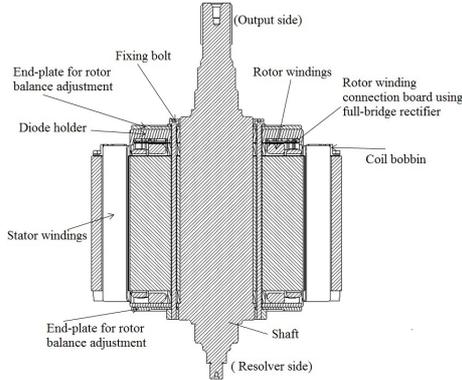
〈2・3〉 提案モータの試作機 提案モータの自己励磁動作と可変速特性を検証するために原理検証用のモータを試作した。Fig. 12 に提案モータの構造と試作機を示す。Fig. 12(a) に示すように補極は Y 字形状の積層鋼板で突極部分に対してクサビ形状に取り付けられている。ロータとステータの鉄心は新日鉄住金製 30DH を用いており, ロータコイルは I-coil と E-coil とともに $\phi 0.8$ の AIW 丸線を採用している。誘導コイルは 53 T, 界磁コイルは 122 T (占積率: 68%) 巻かれており, Fig. 8(c) のように成形とレーシング処理したのちワニス含浸している。ロータ巻線は Fig. 12(d) に示すようにロータコイルエンド部保護とダイオード固定の役割をする樹脂 (PPS) 製カバー内にカソードコモン

の SiC ダイオード (ローム製 SCS230AE2, $V_R = 650$ V, $I_F = 15$ A/leg) を内包し, 一極対ごとに全波整流回路を構成している。真鍮製の端板はバランス修正に加えてダイオード放熱の役割を担っている。ステータは Fig. 12(f) に示すように AIW 平角線 0.8×3.0 を用いており, 30 T/pole でフラットワイズ巻きされている。インシュレータボビンに巻いたのち, ティースにはめ込む構造としワニス含浸している。図示していないが, ステータは水冷式モータケースに焼嵌めして取り付ける構造である。ロータ上でダイオード整流するモデル (Fig. 12(d) に図示) とは別に, ロータ電流を測定するため Fig. 12(g) に示すようにスリップリングを用いて一極対分のダイオード順方向と逆方向の誘導電流測定を行った。

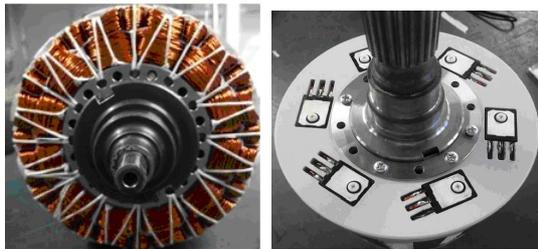
〈2・4〉 試作モータの諸元 今回試作した原理検証用モータの主要諸元を Table 1 に示す。最大負荷時の駆動時間は約 60 s と想定しており, 巻線耐熱クラスは H 種であ



(a) Laminated rotor and stator cores and segmented auxiliary poles.

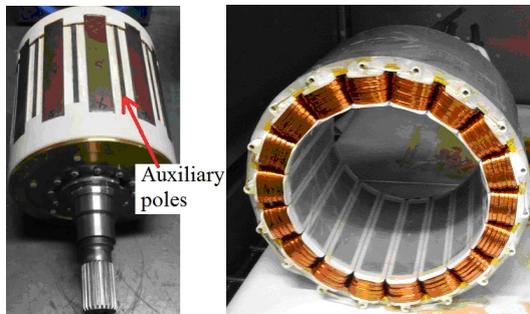


(b) Mechanical configuration of prototype.



(c) Wound-field rotor.

(d) Full-bridge rectifier.



(d) Auxiliary poles.

(f) Concentrated winding stator.



(g) Rotor with slip-rings.

Fig. 12. Mechanical configuration of motor.

る。定格トルク及び定格出力はそれぞれ最大値の半分を想定している。

3. 実機による運転特性の検証

〈3・1〉 ロータ電流特性 汎用インバータを用いてキャ

Table 1. Specifications of prototype motor.

Number of poles	12
Number of slots	18
Stator outer diameter	200 mm
Rotor diameter	138.6 mm
Axial length of core	108 mm
Air gap length	0.7 mm
Maximum current	332.3 A _{rms} (60 s)
Stator winding resistance	10.5 mΩ / phase
Number of stator coil-turn	30 T/pole
Stator winding connection	6 parallel
Number of I-pole coil-turn	53
Number of E-pole coil turn	122
I-coil resistance	0.46 Ω / coil
E-coil resistance	1.18 Ω / coil
Thickness of iron core steel plate	0.30 mm (30DH)

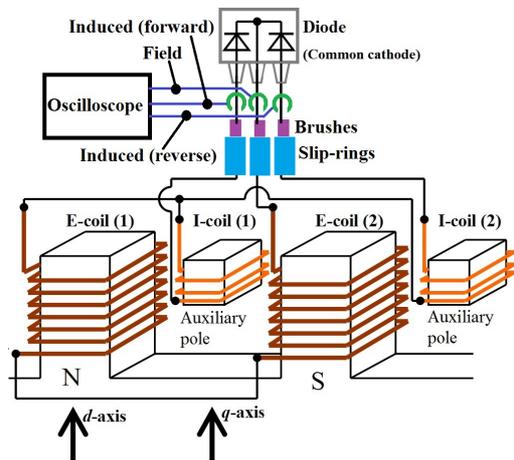


Fig. 13. Rotor current measurement method.

リア周波数 10 kHz とし、ロータ回転速度と電機子電流を変化させたときのロータ電流波形を測定した。ロータ電流は Fig. 12(g) のスリップリング仕様のロータを用いて Fig. 12(d) のダイオード 6 箇所のうち、1 箇所を 3ch のスリップリングに接続し、ブラシを介してモータの外側でダイオード短絡する構成とした。Fig. 13 に示すように電流センサを用いてブラシとダイオード間に流れるロータ電流(誘導電流の順方向と逆方向, 界磁電流)を測定した。一極分の電機子起磁力 414 A_{rms}T, 電流位相 60 deg の条件下でモータ回転速度を 500 r/min と 2000 r/min で比較した結果を Fig. 14 に示す。同図より電気的基本波周波数の U 相電流に対して、その 3 倍調波に当たる順方向電流と逆方向電流が交互に観測される。即ち、ステータ側から励磁することで発生する第 2 次空間高調波(基本波同期回転座標上で観測すると第 3 次時間高調波)がロータ巻線に鎖交し、その誘導起電力によりロータ電流が流れることが確認できる。この誘導電流が整流されることでロータに自励された電磁石磁極が形成される。

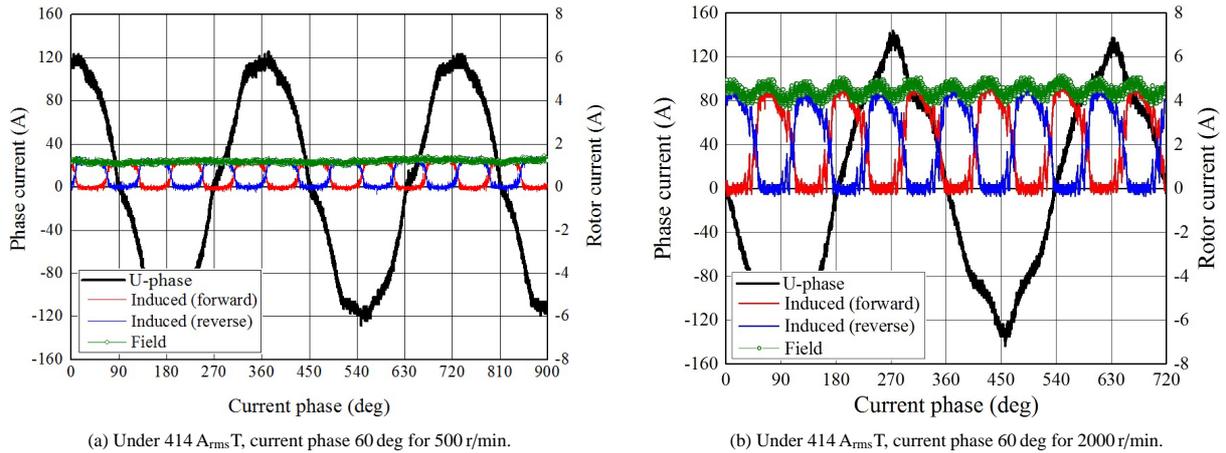


Fig. 14. Stator and rotor current waveforms.

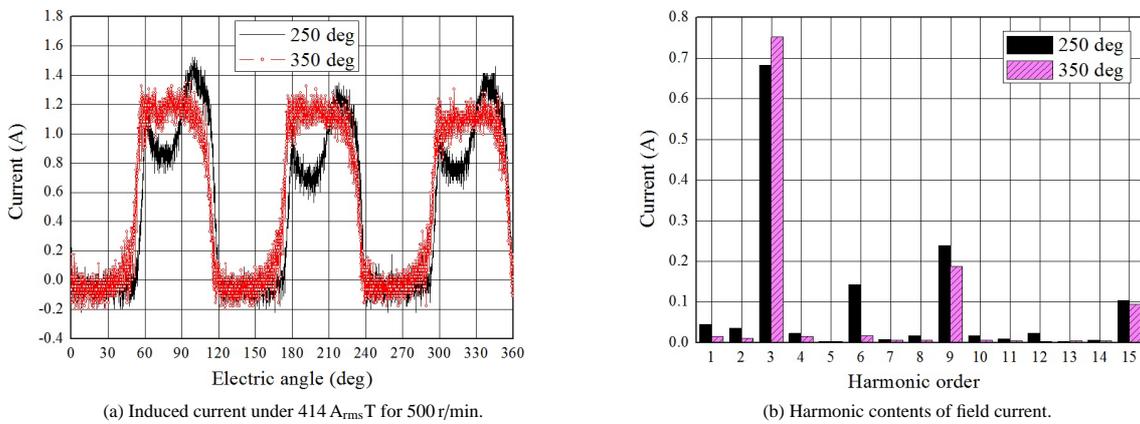


Fig. 15. Induced current waveforms of forward direction and harmonic contents.

さらに、500 r/min と 2000 r/min の結果を比較するとロータ電流の振幅が増加していることが確認できる。提案モータの自励はファラデーの電磁誘導の法則に基づいているため、電氣的周波数が増加するに従い、ロータ巻線の誘導起電力が増加するためである。Fig. 15 に回転速度 500 r/min、電機子起磁力 414 A_{rms} T の励磁条件において電流位相が 250 deg と 350 deg のときで順方向誘導電流を比較した結果を示す。同図より、電流位相によって誘導電流の高調波成分が異なることがわかる。主な高調波成分である第 3 次時間高調波（静止座標系における第 2 次空間高調波）に加えて第 6 次時間高調波（静止座標系における第 5 次と第 7 次空間高調波に起因）の重畳量が大きく異なる。この原因として高調波磁束に対する磁気回路の変化とモータ制御による電流歪の 2 つが考えられる。前者は Fig. 5 と Fig. 11 に示したように高調波磁路と磁気回路の磁気抵抗の関係によりロータ巻線に鎖交する高調波磁束が電流位相によって変化する。ここで電機子電流位相により高調波磁路が変化することによりロータ巻線に鎖交する高調波磁束が変化する理由について述べる。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 で第 2 次空間高調波と基本波の電流位相を説明した際はソリッドロータでインダクタンス一定の近似で説明した。しかし、実際は突極ロータのため Fig. 16 に示すようにインダクタンスが分布しており、電流位相によってステータとロータの磁気結合が変化する。

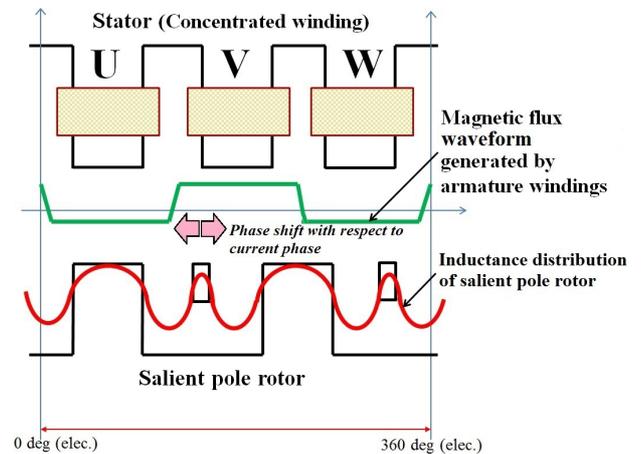


Fig. 16. Magnetic flux density waveform generated by armature windings and inductance distribution of salient pole rotor.

Fig. 17 に電磁界解析により回転速度 1000 r/min、電機子起磁力 1025 A_{rms} T の励磁条件下で電流位相を変化させたときのギャップ磁束密度波形とその調波解析結果を示す。同図より、電流位相によってギャップ磁束密度の基本波振幅や第 2 次空間高調波を含む高調波成分が変化することが分かる。この高調波磁束がロータ巻線に鎖交することでロータコイルに誘導起電力が発生する。次に、後者は Fig. 18 に

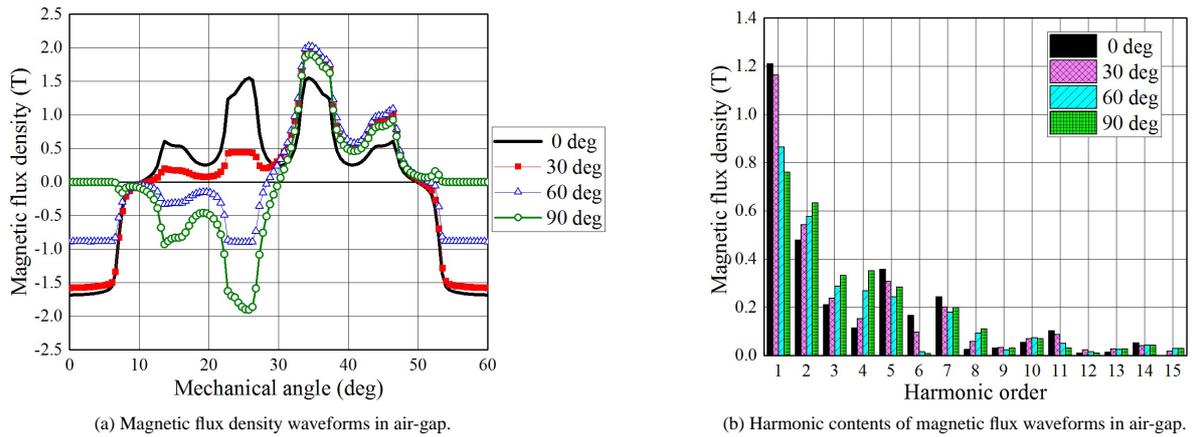


Fig. 17. Magnetic flux density waveforms in air-gap and its harmonic contents with respect to armature current phase under $1025 A_{rms}$ T for 1000 r/min.

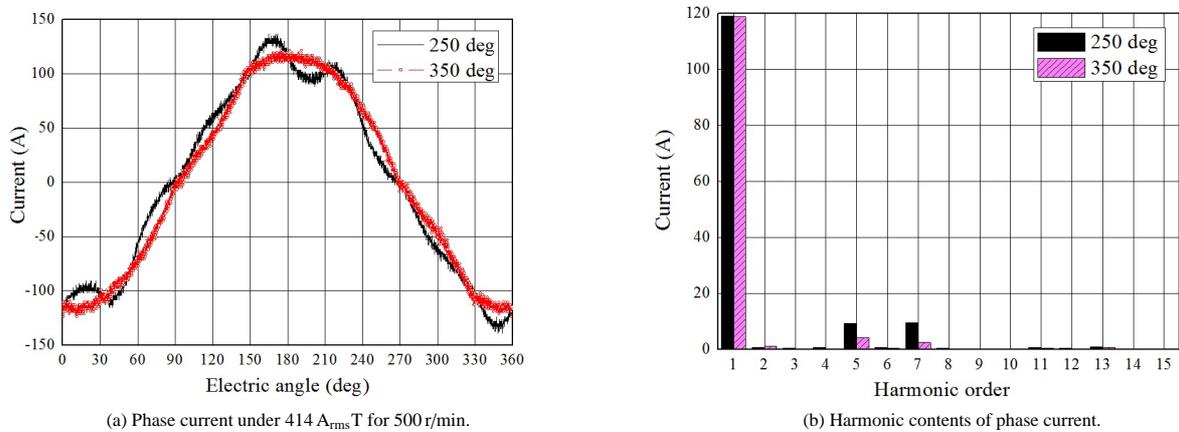


Fig. 18. Phase current waveforms and its harmonic contents.

示すように相電流波形に重畳する高調波成分が電流位相によって異なる。特にデッドタイムなどのモータ制御に起因する第6次時間高調波は電流位相によって大きく変化し、ロータ巻線誘導起電力に影響すると考えられる。電流高調波成分と界磁電流の相関関係についての調査は今後の課題とする。

〈3・2〉 可変速トルク特性 リラクタンストルクと電磁石トルクの分離を行うため、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、Fig. 12(d)に示したようにロータ上で全波整流回路結線した状態でトルクを測定した。トルク測定はモータベンチ側で速度制御、供試モータ駆動用の汎用インバータでトルク制御を行い、トルク検出にはHBM社製トルクフランジ(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10回平均した値である。測定温度条件は、水冷式モータケースの冷却水(LLC)をチャラーにて 65°C 一定になるように温度制御しながら、ステータコイルエンドに取り付けたサーミスタで検出した温度が 60°C から 80°C となる範囲とした。直流バス電圧は300 Vで設定しており、電圧制限以下の範囲で測定を行った。設計仕様上の最大電機子電流は $332.3 A_{rms}$ であるが(一極分の電機子起磁力: $1661.7 A_{rms}\text{T}$, 電流密度: $23.1 A_{rms}/\text{mm}^2$),

測定環境の都合上電機子電流が $210 A_{rms}$ 以下の範囲で測定をした。回転速度についても測定環境の都合上3000 r/minを上限としている。測定は回転速度刻みを500 r/minとし、500 r/minから2000 r/minでは電機子電流を $210 A_{rms}$ 以下、2000 r/minから3000 r/minでは電機子電流を $167 A_{rms}$ 以下とした。

Fig. 19に2000 r/minまでにおける測定した可変速運転時のトルク特性を示す。同図より、従来損失となっていた空間高調波を自励式電磁石トルクとしてダイオード整流回路を用いて活用することで大幅にトルクが向上することが確認できる。MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 点はリラクタンストルクに電磁石トルクも加わることでリラクタンストルクのMTPA点よりも進角する。回転速度の増加に伴い自励式電磁石トルクも増加するため、MTPA点はさらに進角していくことが確認できる。力行と回生でトルク値が異なる要因として、提案モータはFig. 15とFig. 18に示したように電機子電流の時間高調波によってロータ電流が変化するため、モータ制御に起因した影響を受けていると考えられるが、詳細な分析については今後の課題とする。

〈3・3〉 自励式電磁石トルク特性 Fig. 19から総合トルクとリラクタンストルクの差分により電磁石トルクを算出した結果と、電流位相と電機子電流に対するロータ巻線

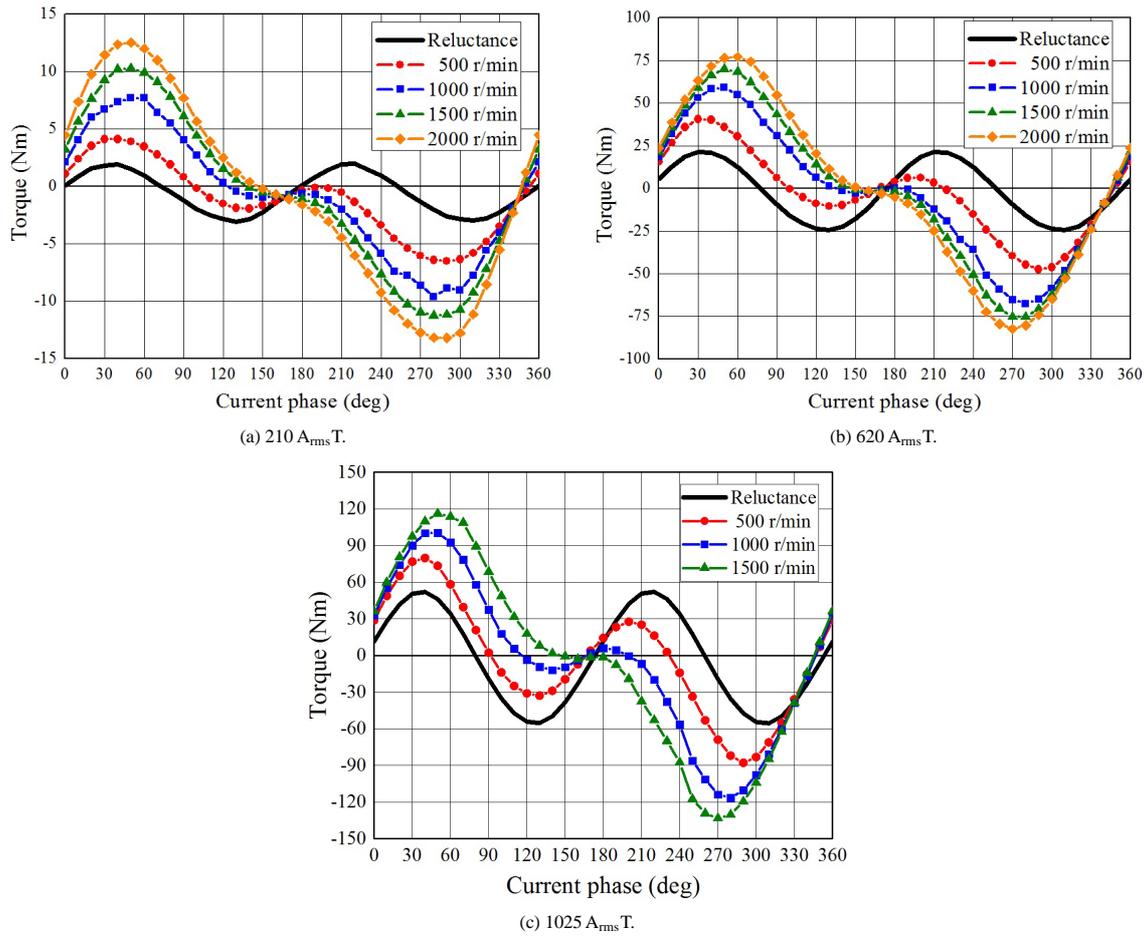


Fig. 19. Torque characteristics with respect to armature magnetomotive force under adjustable speed drive.

界磁電流の特性を Fig. 20 に示す。同図より、自励式電磁石トルクが電機子起磁力と回転速度によって増減するパッシブな可変界磁機能を有していることを確認できる。電磁石トルクは $\sin \delta$ 関数 (δ は電流位相) となり、電機子起磁力が低い領域では電流位相 $\delta = 60 \text{ deg}$ で最大トルクとなるが電機子起磁力が高くなると最大トルク点は進角する傾向がある。一方、ロータ巻線界磁電流は電機子電流や電流位相角によって値が変化する。特に電機子起磁力やモータ回転速度が増加するに従い、界磁電流の電流位相に対する変化量が増加する。この要因は電流進角によりティース先端の磁気飽和の影響が変化するため、漏れ磁束量が変化するためと考えられる。

Fig. 21 に力行時の最大トルク点におけるロータ起磁力(界磁電流と界磁コイルターン数の積)と電機子起磁力の関係を示す。同図に示すように提案モータは前述したとおり電機子起磁力によってパッシブな可変界磁機能を有しているため、従来の永久磁石形同期モータにおいて界磁磁束(磁石磁束)による損失割合が大きい駆動点や高回転域での弱め界磁による損失増加に対して効率改善できる可能性がある。すなわち、パッシブな可変界磁機能を利用して電機子電流や電流位相、もしくは時間高調波を電機子電流に重畳させることでロータ起磁力と電機子起磁力のバランスを調整し、鉄損と銅損の損失比率を調整することで固定界磁の IPMSM

よりも高効率駆動点を調整しやすい可能性がある。一方で、同図より低回転且つ、低負荷(電機子起磁力が低い領域)においてロータ起磁力の低下が問題となる。Fig. 22 に示すように同じ電機子起磁力の条件下においても低回転時はロータ起磁力が低いいため磁束密度が低くなりトルクを出力するためには電機子起磁力を大きくする必要があり効率低下が懸念される。この課題に対して Fig. 15, Fig. 18 から推察される高調波電流と誘導電流の関係や文献(9), (13), (27) で述べたように適切な区間で、パルス電流を電機子電流に重畳させることで時間高調波によって界磁エネルギーを供給することが可能である。今後、電流高調波成分と界磁電流、出力トルク、効率の相関関係について調査を進めることで提案モータの最適な制御法について検討を進める。

〈3・4〉 効率特性 提案モータのロータ巻線を開放しリラクタン্সモータとして運転した状態に対して、ダイオード整流による電磁石トルクを活用することで効率がどの程度変化するかを測定した。入力電力はインバータ出力電力を電力計(横河電機製 WT1600)で測定し、インバータとモータ間の電力線の銅損も考慮している。出力はトルクと回転速度から求めた値である。入力電力と出力ともに1秒間隔で10回平均した値であり、測定条件は3.2節で述べた範囲とした。Fig. 23 にリラクタン্সモータ(力行)として運転した場合とダイオード整流した提案モータ(力行と回生)の効

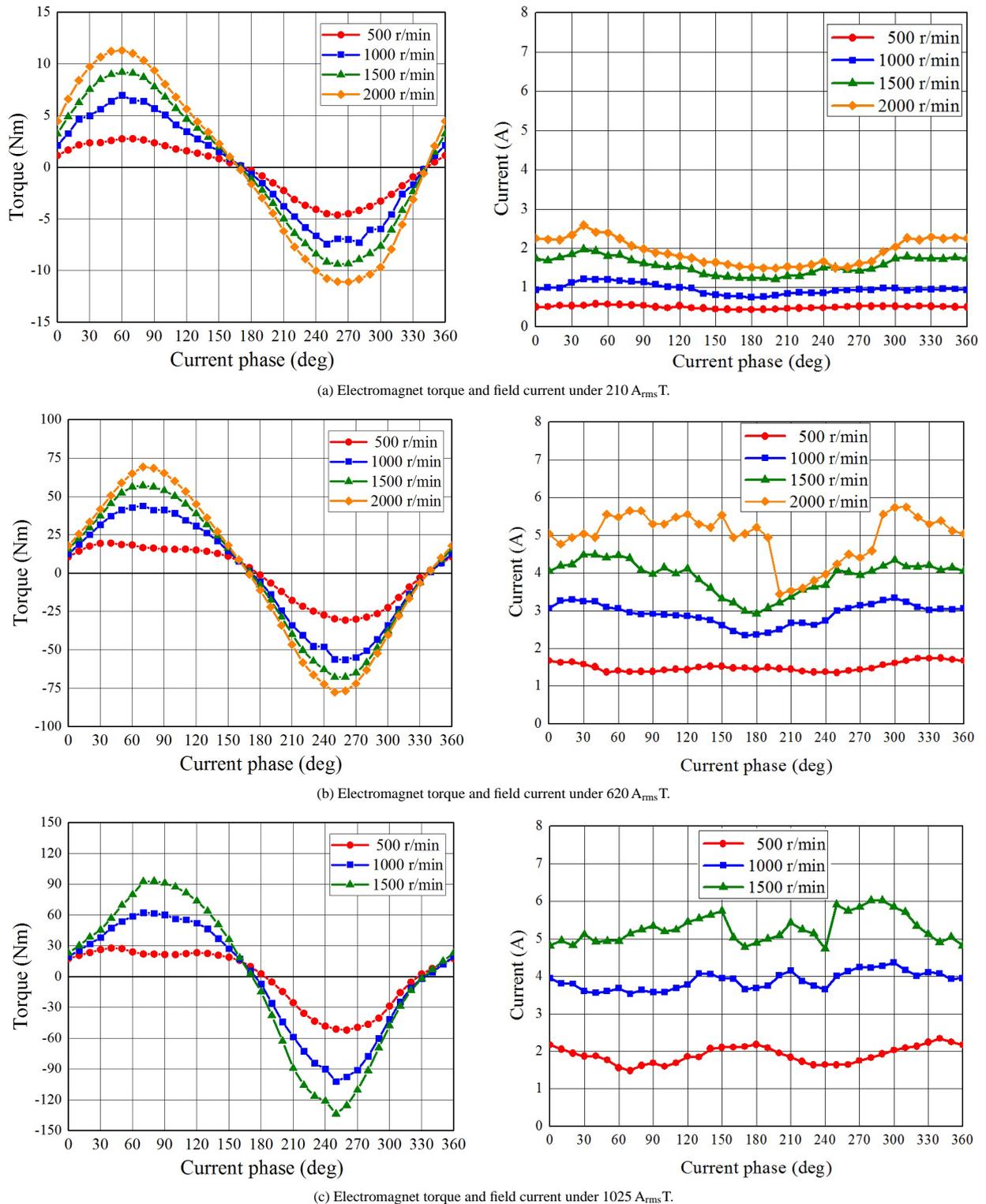


Fig. 20. Electromagnet torque and field current characteristics with respect to armature magnetomotive force under adjustable speed drive.

率マップを示す。500 r/min 刻みで測定しており、不足点は線形補完している。リラクタンストルクは〈3・2〉節で述べたとおり、電機子起磁力が 1025 A_{rms} T の範囲で測定しており、提案モータは 1500 r/min まで 1025 A_{rms} T, 3000 r/min までは 825 A_{rms} T の範囲で測定している。同図より、リラクタンストルクのみの場合、平均的に 70% 台の効率で最大効率

が 84.1% であるのに対して、ダイオード整流による自励式電磁石トルクが加わることで平均的に 90% 前後の効率まで向上している。測定した範囲内においては最大効率が力行時 92.4%, 回生時 92.7% となった。従来損失として消費されていた空間高調波を界磁エネルギー源として活用することで大幅に効率を向上できる。測定環境の都合上 3000 r/min

以下で測定を行ったが、自励式巻線界磁モータの性質から、さらに回転速度が高くなれば93%を上回る効率になると予測できる。一方、1000 r/min以下の領域においてリラクタンスモータと比較して効率向上幅が小さい。前節で述べた

ように今後、提案モータの最適な制御法の検討を進めることで効率向上を目指す。

〈3・5〉 IPMSM との運転特性比較 同じコアサイズ ($\phi 200\text{-L108}$) で試作した分布巻 IPMSM を用いて電機子起磁力励磁条件を共通として効率を比較した。ベンチマークの IPMSM は Fig. 24 に示すように8極48スロット (毎極毎相スロット数 $q = 2$) の分布巻ステータ構造で、エアギャツ

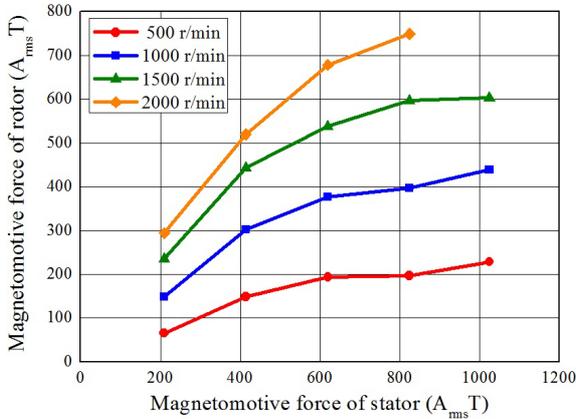


Fig. 21. Relationship between magnetomotive forces of stator and rotor.

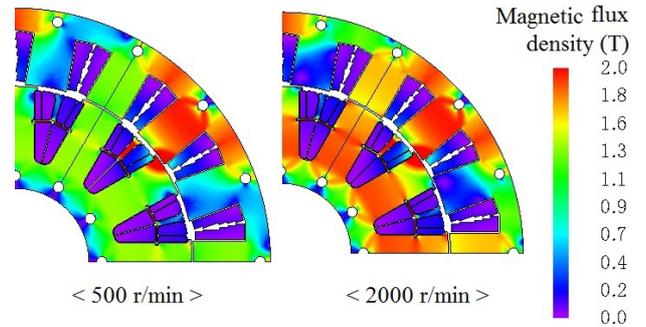
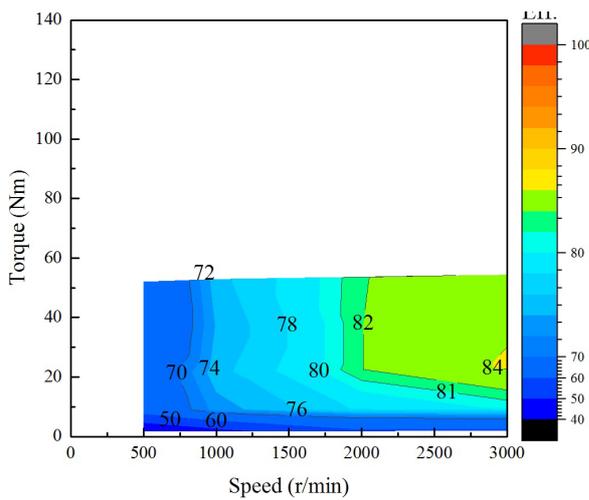
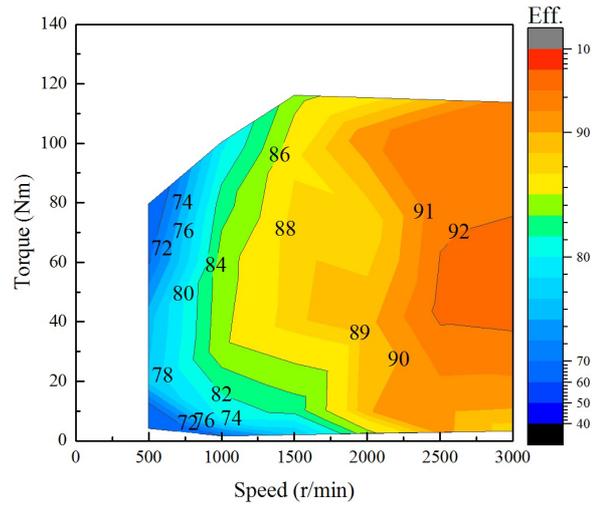


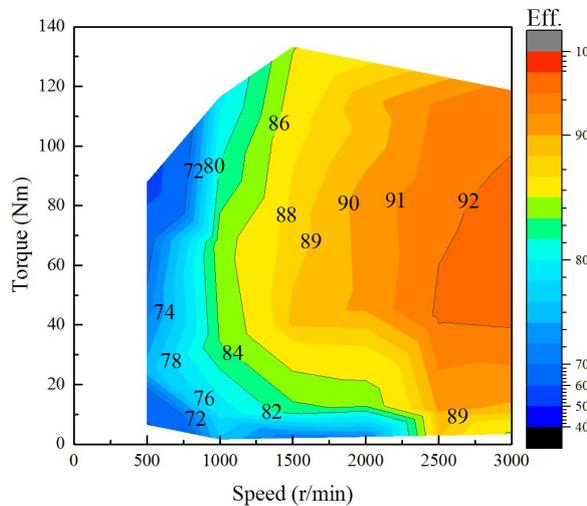
Fig. 22. Magnetic flux density for 500 r/min and 2000 r/min.



(a) Reluctance motor (proposed motor with open rotor windings).

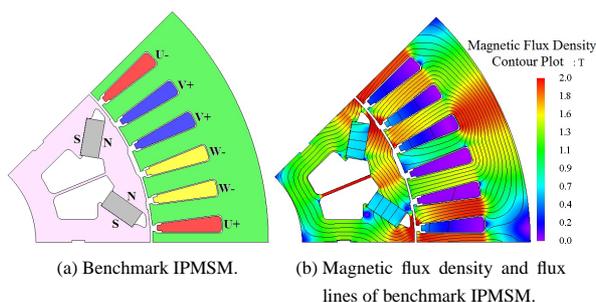


(b) Proposed motor in motoring.



(c) Proposed motor in regenerating.

Fig. 23. Motor efficiency.



(c) Motor cores of benchmark IPMSM.

Fig. 24. Benchmark IPMSM (distributed winding).

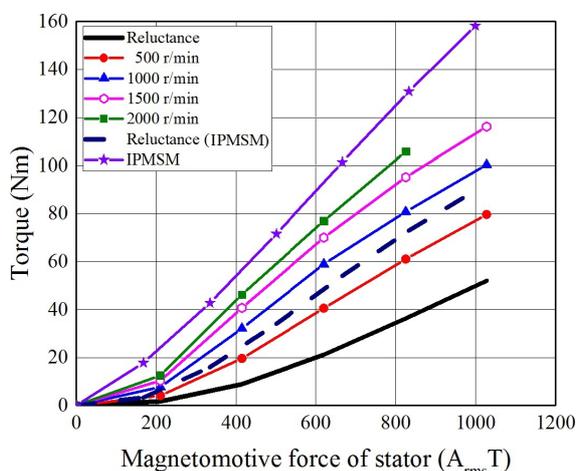


Fig. 25. Magnetomotive force of stator-torque characteristics with respect to rotation speed.

は提案モータと共通の 0.7 mm, 電磁鋼板も同一である。ロータは V 字形に配置した永久磁石を内包した構造であり, リラクタンストルクを積極的に利用し, 且つ磁石使用量を低減できる磁気回路設計をしている⁽²⁸⁾。磁石材料は信越化学工業製 N39UH ($B_r = 1.22$ T, $H_{cb} = 965.7$ kA/m @ 293 K) であり, スキューは施していない。ステータは提案モータと同じく焼嵌めでモータケースに取り付けられており, 冷却能力が同等のモータケースを用いている。Fig. 25 に電機子起磁力に対するトルク特性を示す。ベンチマーク IPMSM のリラクタンストルクは未着磁磁石を内包して測定したもので, 測定環境は〈3・2〉節と〈3・4〉節で述べた条件と同じである。同図より, ベンチマーク IPMSM と提案モータのリラクタンストルクを比較すると提案モータのリラクタンストルクは 50% 以上低い。提案モータは自励式電磁石トルクを向上させるために二重突極構造としているが, 二重突極構造だと磁気抵抗の脈動が大きくなる。その結果, トルクリップルが大幅に増加してしまい有効トルクが

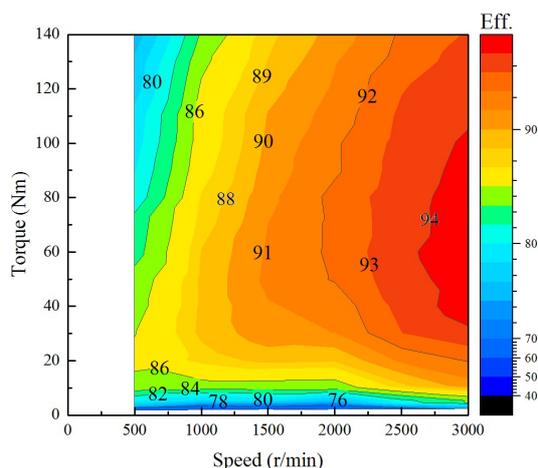


Fig. 26. Motor efficiency of benchmark IPMSM.

低くなる。ロータに補極があるため, ロータ側の突極性が低下している影響もある。一方, ベンチマーク IPMSM の場合, スロット高調波を無視すると非突極構造のステータと突極構造のロータの組み合わせになり提案モータよりも磁気抵抗の脈動が小さい。そのため, 特にトルクリプル発生原因となる第 5 次や第 7 次空間高調波が提案モータよりも低くなり有効トルクが増加する。さらに集中巻のように 1 ティースに磁束が集中せず分散するため, トルク発生面が提案モータよりも広がることでリラクタンストルクが増加する。総合トルクを比較すると提案モータの回転速度が 2000 r/min のとき 2 割ほど提案モータの方がトルクが低い結果となった。一方, リラクタンストルクとマグネットトルクの比率を比較してみると 2000 r/min においては提案モータの方が電磁石トルク (IPMSM のマグネットトルクに相当) 比率が高い。このことからトルク密度を同等にしながら磁石フリー化するためには自励式電磁石トルクが重要になると言える。

Fig. 26 にベンチマーク IPMSM の力行領域における効率マップを示す。Fig. 23 と比較すると提案モータの低回転域における効率の低さが課題となる。一方, 回転速度の増加とともに提案モータの効率が向上して効率差が小さくなっていくことを確認できる。車載を想定した場合, 提案する自励式巻線界磁モータが分布巻 IPMSM に対して運転性能が劣る低回転・低負荷領域の効率とトルク不足は, 市街地走行時の燃費低下と段差乗り上げや登坂性能の低下に直結する。これらの運転領域における性能向上が今後の課題である。

4. 結 言

本論文では, 過去に検討された自己励磁技術を基本原理とし, 極とスロット数の比が 2 対 3 となる集中巻構造のステータと突極ロータを有する二重突極構造でロータ巻線を全波整流回路結線としたモータについて述べた。ロータ突極間に補極を設けることで静止座標系で第 2 次空間高調波 (基本波同期回転座標系で第 3 次時間高調波) を界磁エネ

ルギー源として効率的に活用できる自励式巻線界磁形同期モータを試作し実機検証を行った。提案したモータではスロットコンビネーションによって発生する回転座標系での第3次時間高調波が主な界磁エネルギー源となることを実験的に明らかにするとともに、ロータ電流の回転速度、電機子電流、電流位相、電機子電流に重畳する時間高調波に対する依存性を検証した。さらに電流位相-トルク特性を実験的に明らかにし、自励式電磁石トルクの回転速度、電機子電流、電流位相に対する依存性を実験的に確認した。また、効率特性を明らかにし、同コアサイズの分布巻 IPMSM と特性を比較することで自励式巻線界磁形同期モータの運転特性の利点と課題を示した。

以上の検討から下記の知見を得ることができた。

- ① 数値解析により、 q 軸に補極を設けることで従来技術の d 軸高調波磁束を活用した自励式巻線界磁モータに対して q 軸高調波磁束も活用できる。
- ② ロータ電流測定結果から、提案するモータは集中巻ステータに起因して発生する第3次時間高調波（静止座標系における第2次空間高調波）がロータ巻線に鎖交して誘導電流が順方向と逆方向に流れて整流されることで界磁電流を自己励磁できる。
- ③ 同じコアサイズ且つ励磁条件下のリラクタンسモータに対して、ロータに自励式巻線を備えて電磁石トルクを活用することで力行トルクが低負荷時 ($210 A_{rms} T$) は、 $500 r/min$ で 153.4%、 $1000 r/min$ で 396.0%、 $1500 r/min$ で 522.7%、 $2000 r/min$ で 642.0% 向上、中負荷時 ($1025 A_{rms} T$) は、 $500 r/min$ で 156.8%、 $1000 r/min$ で 193.3%、 $1500 r/min$ で 223.5% 向上できる。
- ④ 同じコアサイズ且つ励磁条件下のリラクタンスモータに対して、ロータに自励式巻線を備えて電磁石トルクを活用することで力行効率を約 8~10% 向上できる。
- ⑤ 同じコアサイズ且つ励磁条件下の分布巻 IPMSM に対して、力行効率が極低回転時は約 8% 低い回転速度が増加するに従い効率差異が小さくなる。 ($3000 r/min$ で力行効率が IPMSM に対して提案モータは約 2% 低い)。
- ⑥ 自励式電磁石トルクは電機子電流振幅、電流位相角、回転速度、高調波電流によってパッシブな可変界磁機能を有している。

以上のことから、提案する自励式巻線界磁形同期モータはリラクタンストルクと同等以上の電磁石トルクを活用でき、磁石フリーで高トルク設計を行うためには有用な技術であると言える。

今後は、実機にて補極による q 軸高調波磁束利用の効果検証と $3000 r/min$ 以上の運転領域における測定を行い、損失分析・評価を進める。基本的な性能評価に加えて、特に文献(26)で述べられている鉄損への影響について、スリップリングを用いた他励可能な試作機と自励する試作機にて同じロータ起磁力下で評価を行う。また、モータ制御に起因する電流高調波成分と界磁電流の相関について調査を進める。さらに性能を大きく左右するロータ巻線電流をステ

ータ側から推定するための数学モデルの検討を進め、提案するモータの最適制御法についても考究する。

文 献

- (1) M. Kamiya: "Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System", *IEEE Trans. IA*, Vol.126, No.4, pp.473-479 (2006)
- (2) Y. Sato, S. Ishikawa, T. Okubo, M. Abe, and K. Tamai: "Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle", SAE Technical Paper 2011-01-0350 (2011)
- (3) K. Kato and M. Morimoto: "Power Distribution of Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans. IA*, Vol.131, No.5, pp.766-767 (2011) (in Japanese)
加藤健大・森本雅之:「ハイブリッド自動車の動力分担の検討」, 電学論 D 研究開発レター, Vol.131, No.5, pp.766-767 (2011)
- (4) S. Okuma: "Vehicular Technology", *IEEE Trans. IA*, Vol.122, No.7, pp.578-683 (2002) (in Japanese)
大熊 繁:「自動車技術」, 電学論 D 解説, Vol.122, No.7, pp.1238-1244 (2002)
- (5) M. Kamiya, H. Awata, T. Miura, Y. Yagyu, T. Kosaka, and N. Matsui: "Permanent Magnet Temperature Analysis Considering PWM Carrier Harmonics for Interior Permanent Magnet Synchronous Generator in Hybrid Vehicles", *IEEE Trans. IA*, Vol.127, No.12, pp.473-479 (2007) (in Japanese)
神谷宗宏・粟田秀哉・三浦徹也・柳生泰秀・小坂 卓・松井信行:「キャリア高調波を考慮したハイブリッド車用埋込磁石形同期発電機の磁石温度解析」, 電学論 D, Vol.127, No.12, pp.473-479 (2007)
- (6) 平本健二・中井英雄・山田栄治・蓑島紀元・瀬口正弘:「回転電機及びその駆動制御装置」, 公開特許広報 (A), 特開 2009-11209 (2007)
- (7) K. Hiramoto, H. Nakai, E. Yamada, N. Minoshima, and M. Seguchi: "Rotary Electric Machine and Driving Controller for Rotary Electric Machine", US20100259136 (Published in 2010)
- (8) K. Hiramoto and H. Nakai: "Proposal and Feasibility Study of the Integrated Diode Synchronous Motor", IEEJ Annual Meeting, No.5-054, pp.97-98 (2014) (in Japanese)
平本健二・中井英雄:「ダイオード整流型磁石フリーモータの提案と原理検証」, H26 年度電学全大, No.5-054, pp.97-98 (2014)
- (9) K. Hiramoto, H. Suzuki, H. Nakai, E. Yamada, R. Mizutani, and N. Minoshima: "Increment of the Integrated Diode Synchronous Motor in the Low Revolution Speed Area", IEEJ Annual Meeting, No.5-055, pp.99-100 (2014) (in Japanese)
平本健二・鈴木博光・中井英雄・山田栄治・水谷良治・蓑島紀元:「ダイオード整流型磁石フリーモータの低回転域トルクの向上」, H26 年度電学全大, No.5-055, pp.98-100 (2014)
- (10) 山田栄治・水谷良治・平本健二・中井英雄・蓑島紀元:「回転電機及び回転電機駆動システム」, 公開特許広報 (A), 特開 2012-222940
- (11) 山田栄治・水谷良治・知念真太郎・平本健二・中井英雄・蓑島紀元:「回転電機」, 公開特許広報 (A), 特開 2012-222941
- (12) K. Hiramoto, H. Nakai, H. Suzuki, Y. Kano, R. Mizutani, E. Yamada, and N. Minoshima: "Considerations of Changes in Magnetic Fields in the Integrated Diode Synchronous Motor", IEEJ Technical Meeting, MD-14-89, RM-14-52, VT-14-24 (2014) (in Japanese)
平本健二・中井英雄・鈴木博光・加納裕子・水谷良治・山田英治・蓑島紀元:「ダイオード整流型磁石フリーモータの誘導メカニズム」, 電学モータドライブ/回転機/自動車合同研資, MD-14-89, RM-14-52, VT-14-24 (2014)
- (13) E. Yamada, W. Ang, M. Okamura, R. Mizutani, K. Hiramoto, H. Suzuki, and H. Nakai: "Restriction on Peak Value of Pulsation Current in the Integrated Diode Synchronous Motor", IEEJ IA Society Conference, 3-25, pp.III-183-186 (2014) (in Japanese)
山田英治・洪 遠齡・岡村賢樹・水谷良治・平本健二・鈴木博光・中井英雄:「ダイオード整流型磁石フリーモータのバルス電流重畳時の電流ピーク抑制方法の検討」, 平成 26 年度電学産業応用部門大会, 3-25, pp.III-183-186 (2014)
- (14) K. Hiramoto, H. Nakai, E. Yamada, and R. Mizutani: "An application of the Integrated Diode Synchronous Motor to Traction Drive Motors", IEEJ IA Society Conference, 3-26, pp.III-187-192 (2014) (in Japanese)
平本健二・中井英雄・山田英治・水谷良治:「ダイオード整流型磁石フリーモータの駆動モータへの適用」, 平成 26 年度電学産業応用部門大会, 3-26, pp.III-187-192 (2014)
- (15) M. Aoyama and T. Noguchi: "Preliminary Study on Rare-Earth Free Motor with Field Pole Excited by Space Harmonics", 2013 Annual Meeting IEEJ, No.5-051, pp.91-92 (2013) (in Japanese)
青山真大・野口季彦:「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの基礎検討」, H25 年度電学全大, No.5-051, pp.91-92 (2013)

- (16) M. Aoyama and T. Noguchi: "Adjustable Speed Drive Characteristics on Rare-Earth Free Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics", *IEEJ*, SPC-13-070, MD-13-012 (2013) (in Japanese)
青山真大・野口季彦:「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの可変速特性」, 電学半導体電力変換/モータドライブ合同研資, SPC-13-070, MD-13-012 (2013)
- (17) M. Aoyama and T. Noguchi: "Torque Performance Improvement with Modified Rotor Winding Circuit of Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics", *IEEJ Trans. IA*, Vol.134, No.12, pp.1038-1049 (2014) (in Japanese)
青山真大・野口季彦:「空間高調波を界磁エネルギー源とする自励式巻線界磁同期モータの回転子巻線回路変更によるトルク特性改善」, 電学論 D, Vol.134, No.12, pp.1038-1049 (2014)
- (18) G. Dajaku and D. Gerling: "New Self-Excited Synchronous Machine with Tooth Concentrated Winding", 3rd International Electric Drives Production Conference 2013 (EDPC-2013), Erlangen-Nurnberg, Germany (2013)
- (19) S. Nonaka: "The Self-Excited Type Single-Phase Synchronous Motor", *IEEJ Trans.*, Vol.78, No.842, pp.1430-1438 (1958) (in Japanese)
野中作太郎:「自励形単相同期電動機」, 電学誌, Vol.78, No.842, pp.407-412 (1958)
- (20) S. Nonaka: "The Brushless Self-Excited Type Single-Phase Synchronous Generator", *IEEJ Trans.*, vol.82, No.883, pp.627-634 (1962) (in Japanese)
野中作太郎:「ブラシ無し自励形単相同期発電機」, 電学誌, Vol.82, No.883 pp.627-634 (1962)
- (21) S. Nonaka and I. Muta: "An Analytical Study of the Brushless Self-Excited Type Single-Phase Synchronous Generator", *IEEJ Trans.*, Vol.86, No.934, pp.1140-1149 (1966)
野中作太郎・牟田一弥:「ブラシなし自励形単相同期発電機の解析的研究」, 電学誌, Vol.86, No.934, pp.1140-1149 (1966)
- (22) S. Nonaka, K. Kesamaru, and K. Horita: "Analysis of Brushless Three-Phase Synchronous Generator Without Exciter", *IEEJ Trans. IA*, Vol.112, No.5, pp.483-489 (1992) (in Japanese)
野中作太郎・袈裟丸勝巳・堀田一夫:「励磁機なしブラシレス三相同期発電機の解析」, 電学論 D, Vol.112, No.5, pp.483-489 (1992)
- (23) J. Oyama, S. Toba, T. Higuchi, and E. Yamada: "The principle and Fundamental Characteristics of Half-Wave Rectified Brushless Synchronous Motor", *IEEJ Trans. IA*, Vol.107, No.10, pp.1257-1264 (1987) (in Japanese)
小山 純・鳥羽俊介・樋口 剛・山田英二:「半波整流ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」, 電学論 D, Vol.107, No.10, pp.1257-1264 (1987)
- (24) J. Oyama, T. Higuchi, N. Abe and E. Yamada: "The principle and Fundamental Characteristics of AC-Excited Brushless Synchronous Motor", *IEEJ Trans. IA*, Vol.109, No.7, pp.515-522 (1989) (in Japanese)
小山 純・樋口 剛・阿部稔彦・山田英二:「交流励磁方式ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」, 電学論 D, Vol.109, No.7, pp.515-522 (1989)
- (25) T. Fukami, K. Taka, T. Miyamoto, and F. Shibata: "A New Self-Excitation Scheme for Three-Phase Synchronous Generators", *IEEJ Trans. IA*, Vol.114, No.11, pp.1083-1089 (1994) (in Japanese)
深見 正・高 香滋・宮本紀男・柴田福夫:「三相同期発電機の新しい自己励磁法」, 電学論 D, Vol.114, No.11, pp.1083-1089 (1994)
- (26) T. Fukami, Y. Hanada, and T. Miyamoto: "Analysis of the Self-Excited Three-Phase Synchronous Generator Utilizing the 2nd-Space Harmonic for Excitation", *IEEJ Trans. IA*, Vol.117, No.1, pp.57-65 (1997) (in Japanese)
深見 正・花田芳明・宮本紀男:「第2次空間高調波で励磁する自励三相同期発電機の解析」, 電学論 D, Vol.117, No.1, pp.57-65 (1997)
- (27) M. Aoyama and T. Noguchi: "Preliminary Study on Active Magnetization Control of Rare-Earth Free Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics", *IEEJ*, MD-13-035, RM-13-044 (2013) (in Japanese)
青山真大・野口季彦:「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータのアクティブ磁化制御の基礎検討」, 電学モータドライブ/回転機合同研資, MD-13-035, RM-13-044 (2013)
- (28) 青山真大:「磁石使用量を最適化した磁路分散型 d 軸空隙 IPM モータの提案」, 電学自動車研資, VT-13-015 (2013)

青山真大 (正員) 1984年3月12日生。2006年3月長岡技術科学大学工学部電気電子情報課程卒業。2008年3月豊田工業大学大学院修士課程先端工学専攻修了。同年4月より、スズキ(株)入社。HEV, EV用駆動モータの研究開発・設計に従事。2012年10月社会人学生として、静岡大学創造科学技術大学院後期博士課程自然科学系教育部環境・エネルギーシステム専攻入学、現在に至る。IEEE



Member.

野口季彦 (正員) 1959年10月23日生。1982年3月名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。1986年3月長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程電気・電子システム工学専攻修了。1982年4月東京芝浦電気(株)(現、(株)東芝)入社。1991年岐阜工業高等専門学校講師。1994年4月長岡技術科学大学助手。1996年同助教授。2009年4月静岡大学教授、現在に至る。専門は各種電力変換器, マシンを含むモータドライブ。近年は, マルチレベル変換器, AC/AC直接変換器, 超高速モータに注力。博士(工学)。IEEE Senior



Member.