

空間高調波を利用したラジアルギャップ形 自動可変界磁 PM モータの提案と可変速特性

熊井 巧* 青山 真大 (静岡大学)

Proposal and Adjustable Drive Characteristics of Radial Gap Type Automatic Variable Flux PM Motor Utilizing Space Harmonics

Takumi Kumai*, Masahiro Aoyama, (Shizuoka University)

In this paper, a variable flux PM motor based on the new principle is proposed and revealed its performance with the prototype. The principle of this proposed motor is based on the self-excitation utilizing space harmonics that are inevitably generated in the concentrated winding structure. In addition, it has a passive variable flux function. Its rotor is composed of consequent poles for each N-pole and S-pole pair and self-excited wound-field poles. Its superiority of the proposed variable flux technique is clarified experimentally via the prototype.

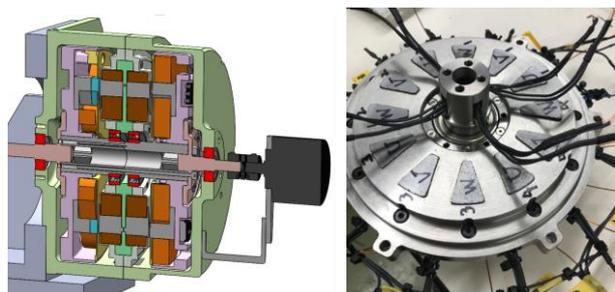
キーワード：可変界磁，コンシクエント，空間高調波，ラジアルギャップ，集中巻ステータ，ダイオード整流回路
(Keywords, variable flux, consequent, space harmonic, radial gap, concentrated winding stator, diode rectifier circuit)

1. はじめに

近年，地球温暖化対策を契機に世界的に CO₂ 削減の取り組みが行われている。自動車業界では，その取り組みとして車両の電動化が進められ，ハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) の研究開発が推し進められている。車載されるモータは，低速回転から高速回転における可変速域で，広い駆動範囲において高効率であることが求められる。現在，車載されている永久磁石同期モータは，低速大トルク運転と高速運転時において効率が悪くなる傾向がある。低速大トルク運転では，電機子巻線に大電流が流れることによる銅損に起因し，高速運転では，弱め界磁制御による d 軸電流によってギャップ磁束が歪み，鉄損が増加することに起因して効率が悪くなる。

これらの問題に対して，近年，可変界磁モータの研究開発が推し進められ，様々な可変界磁モータが開発されてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。文献(1)の可変界磁メモリモータは意図的に低保磁力の磁石を用いて， d 軸電流に大電流パルスを重ねて磁石磁力を増減磁させる構造となっている。文献(2)のハイブリッド界磁モータは，永久磁石と巻線界磁を併用し，界磁巻線に流す電流を DC/DC コンバータで制御している。文献(3)の磁気飽和を利用した可変界磁モータは，ロータ内部の磁石磁束の短絡磁路に軟磁性材料を配置し，零相電流による零相磁束により，軟磁性材料の透磁率を変化させ，電機子鎖交磁束を調整している。文献(4)の自動的可変界磁モータは，ロータに備えられた自励式巻線界磁極により，集中巻構造で不可避に発生する第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源として利用しており，このモータは回転速度や電機子起磁力の増加によって自動的に可変界磁を行う。文献(1)-(3)のいずれも可変界磁量は，インバータや外部アクチュエータを介して制御している。それに対して，文献(4)の自動的可変界磁モータは外部制御器が不要で，可変界磁量の制御も不要である。

上記のことを鑑みて，筆者らは，自動的可変界磁モータに着目した。このモータの概観とロータ巻線の配線を図 1 に示す。このモータは，ダブルロータ構造のアキシアルギャップ構造を採用することで，大トルク化を実現しているが，2つのロータ間の巻線を結線する必要があり，構造が複雑であるという課題があった。本研究は上記の課題を解決



(a) Schematic of motor. (b) Wiring of rotor winding.

図 1 自動的可変界磁 PM モータ⁽⁴⁾

Fig. 1. Automatic variable flux PM motor⁽⁴⁾.

するために、新たなロータ磁気回路トポロジーを用いて 2 つのロータ間を接続しなくても、自動可変界磁できる原理を提案する。本稿では、将来的なアキシアルギャップ構造への応用を見据えて、ラジアルギャップ構造での検討を行う。最初に、提案モータの自動可変界磁技術の原理の説明を行い、次に電磁界解析による性能予測を行う。そして、原理検証機について述べ、実機にて自動可変界磁を基礎検証したので報告する。

2. 提案モータの原理と構造

〈2・1〉 原理 第 2 次空間高調波を可変界磁のエネルギー源として利用する原理について述べる。集中巻ステータにおいて V 相の電流が最大値をとるときの電機子起磁力による磁束密度分布を図 2 に示す。図 2 より、磁束密度分布が矩形波のような波形になっており、多くの高調波を含んでいることがわかるが、その高調波の中でも第 2 次高調波の割合は大きい。図 2 の波形をフーリエ変換し、その基本波成分と第 2 次高調波成分を図 3 に示す。第 2 次高調波の進行方向は基本波に対して逆向であり、ロータの回転に同期していない⁶⁾。そのため、電機子起磁力の第 2 次空間高調波はロータ上で磁束密度を変動させる原因となり、従来のモータにおいては渦電流が発生して損失となる。

一方、提案モータでは、ダイオード整流回路結線された巻線界磁を併用したロータを基盤とし、第 2 次空間高調波がロータ巻線に鎖交することで起電力を得て、ダイオード整流を介して界磁エネルギー源として利用する。従来の方式である文献(4)のモータの磁気回路を図 4 に示す。この磁気回路では 1 極毎にイメージポールを形成する構造となっており、イメージポールには励磁コイル (I-coil : Induction coil) と界磁コイル (F-coil : Field coil) を備えている。ここで、I-coil は空間高調波から起電力を得る役割をし、F-coil は整流回路を介して界磁極を形成する役割をする。1 極毎にイメージポールを形成する構造は、界磁起磁力がアンバランスになり、電機子の誘起電圧に偶数次成分が生じる。その対策として、文献(4)ではダブルロータ構造を採用することで偶数次成分の対策をしている。しかし、2 つのロータ間の巻線を結線する必要があり、構造が複雑である。

一方、提案モータでは図 5 の新しい磁気回路トポロジーを採用する。図 4 の磁気回路とは異なり、1 極対毎にイメージポールを形成する構造となっており、界磁起磁力はバランスされ、電機子の誘起電圧に偶数次成分が生じない。さらに 1 つのロータ内で整流回路結線できるため、構造を簡単化できる。

また、提案モータでは図 5 の磁気回路の変更のほかに、イメージポールである鉄極の形状にも新しい磁気回路トポロジーを採用した。提案する鉄極の形状を図 6 に示す。イメージポール 1 極あたり 3 本のティースを備える構造により、図中の矢印で示した第 2 次空間高調波の磁路が形成される。これは、I-coil に鎖交する第 2 次空間高調波を増加させ、I-coil の起電力を大きくすることを可能にする。

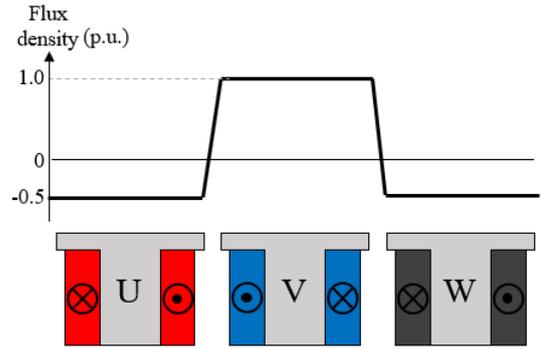


図 2 集中巻ステータの磁束密度分布

Fig. 2. Magnetic flux distribution of concentrated winding stator.

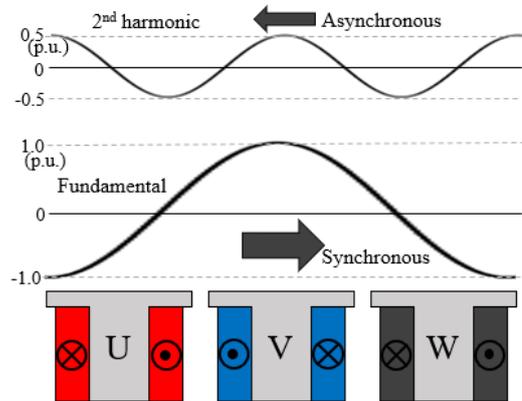


図 3 基本波と第 2 次高調波

Fig. 3. Fundamental and 2nd harmonic.

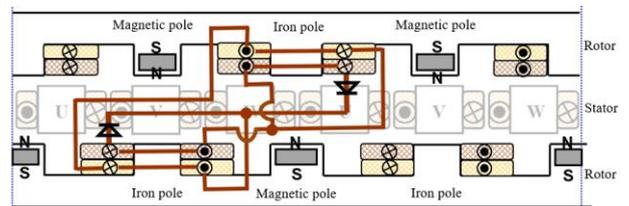


図 4 従来の磁気回路

Fig. 4. Conventional magnetic circuit.

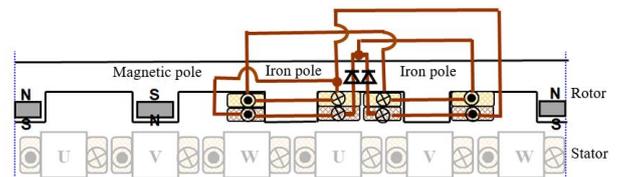


図 5 提案する磁気回路

Fig. 5. Proposed magnetic circuit.

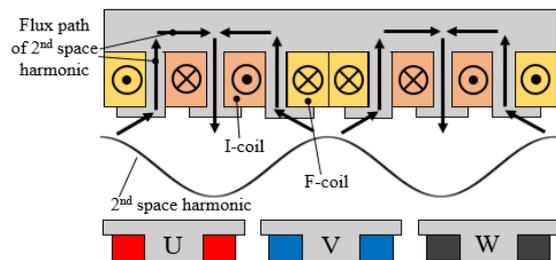


図 6 鉄極の新しい磁気回路

Fig. 6. New magnetic circuit of iron pole.

〈2・2〉 提案モータの構造 提案モータの断面図を図 7 に示し、モータ構成を図 8 に示す。また、提案モータの主要諸元を表 1 に示す。提案モータは I-coil, F-coil のスペースを確保する目的からアウトロータ型を採用した。ロータは 1 極対毎に I-coil と F-coil が備わったイメージポールがあるコンシクエントポール構造となっている。I-coil の巻く向きは全て内向きとし、F-coil は N 極では内向き、S 極では外向きとしている。ロータコアは I-coil と F-coil の占積率を最大化する目的から分割コアとした。ロータコアは新日鉄住金製の 35H230 を採用している。ステータは、MITSUBA 製の CQ ブラシレスモータのステータを用いている⁶⁾。永久磁石はフェライト磁石を用い、着磁方式は平行着磁、常温時の残留磁束密度は 0.4 T であり、また、ステータに対して上下に 6.5 mm のオーバーハングがある設計としている。ロータヨークは SUS403 である。次に、ロータ巻線整流回路を図 9 に示す。I-coil, F-coil はそれぞれを全て直列接続し、全波整流回路を構成している。回路中のダイオードは順方向電圧の小さいショットキーバリアダイオードを採用した。ロータ巻線整流回路はモータ背面のスペースを使って結線する。

表 1 提案モータの主要諸元

Table 1. Main specifications of proposed motor.

Number of poles and slots	12 poles, 18 slots
Armature winding connection	All-series, Y-connection
Stator outer diameter	95 mm
Rotor outer diameter	130 mm
Air gap length	0.75 mm
Stack length of stator	27 mm
Axial length of magnet	40 mm
Number of armature coil turns	20
Number of I-coil turns	24
Number of F-coil turns	45
Armature coil resistance	210 mΩ / phase
I-coil resistance	71 mΩ / coil
F-coil resistance	195 mΩ / coil

3. 電磁界シミュレーション

〈3・1〉 基本特性 JMAG-Designer18.0TMにより図 7 の 2D モデルの解析を行った。回転速度 2000 r/min, 電機子電流 8 A_{rms}, 電流位相 0 deg としたときの第 2 次空間高調波のベクトル分布を図 10, 開放時の I-coil, F-coil における誘起電圧を図 11 に示す。図 11 は、I-coil と F-coil が図 9 のように全直列された状態での誘起電圧である。図 10 より、第 2 次空間高調波が I-coil に鎖交していることが確認できる。図 11 より I-coil では主に第 3 次時間高調波が確認できるが、これは、基本波と逆相の第 2 次空間高調波は、基本波に同期して回転しているロータ上から観測すると、第 3 次時間高調波となるからである。また、F-coil は I-coil の 2 倍近い巻数であるが、図 11 より F-coil の誘起電圧は I-coil に比べ低いことが確認できる。これにより、界磁磁束の交流成分を抑

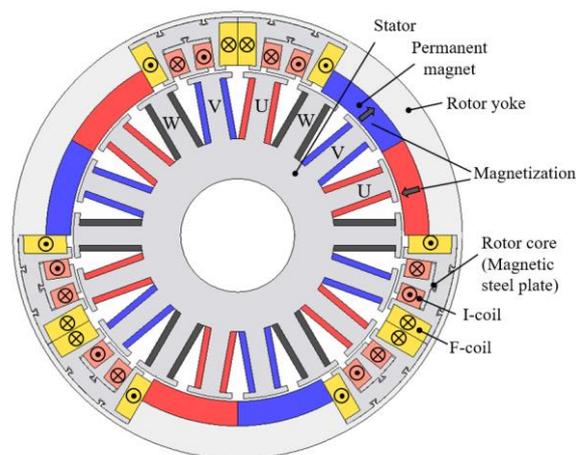


図 7 提案モータの断面図

Fig. 7. Cross section of proposed motor.

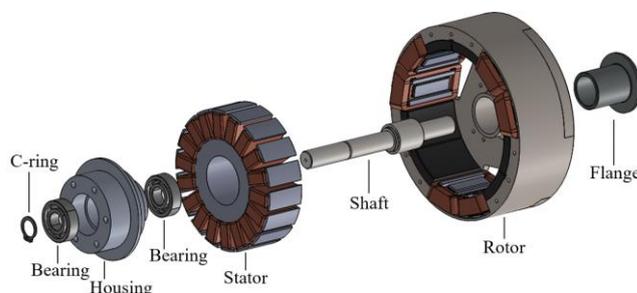


図 8 提案モータ構成

Fig. 8. Schematic structure of proposed motor.

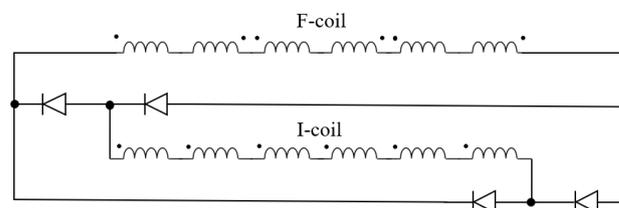


図 9 ロータ巻線整流回路

Fig. 9. Rotor winding rectifier circuit.

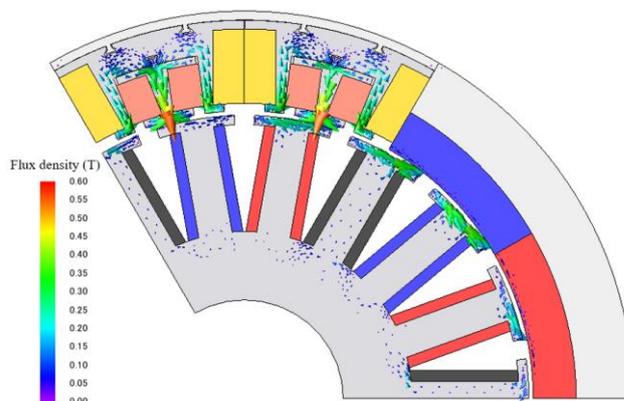


図 10 第 2 次空間高調波のベクトル分布

Fig. 10. 2nd space harmonic vectors distribution.

制できる。

次に、回転速度 2000 r/min の条件で、電機子電流を $4 A_{rms}$ 刻み、電流位相を 15 deg 刻みで変化させたときの電流位相-界磁電流特性を図 12 に示す。図 12 より、電機子電流が増加すると界磁電流が増加することがわかる。これは、電機子起磁力が大きくなったことにより、電機子起磁力に含まれる第 2 次空間高調波も受動的に大きくなるからである。また、界磁電流は電流位相が 0 deg 近傍で最大となり、 -90 deg や 90 deg に振れるにつれ減少していることがわかる。これは、電流位相を変えると I-coil が位置している d 軸における電機子磁束の第 3 次時間高調波の大きさが変化するからである。図 13 に、電機子電流を $8 A_{rms}$ 、電流位相を 0 deg 、 -90 deg 、 90 deg としたときの電機子起磁力による d 軸の磁束密度の時間変化と調波解析結果を示す。図 13 より、それぞれの電流位相で、 d 軸の電機子磁束に第 3 次時間高調波が確認できる。調波解析結果より、その第 3 次時間高調波の大きさは電流位相が -90 deg 、 90 deg のときに比べ、 0 deg では 2 倍近く大きいことが確認できる。これにより、電流位相を -90 deg や 90 deg に振ることにより d 軸の第 3 次時間高調波が小さくなり、I-coil の誘起電圧が小さくなるため、界磁電流が小さくなる。以上より提案モータは、電機子電流を増加させると自動的に界磁が強まる。一方、電流位相を進角させると自動的に界磁が弱まる可変界磁機能を有していることがわかる。

〈3・2〉 可変速特性 次に、提案モータの可変速特性について述べる。ベンチマークとして MITSUBA 製の CQ ブラシレスモータを用いており、非コンシクエントポール構造の SPM モータである⁽⁶⁾。また、I-coil と F-coil を開放したコンシクエントポールモータもベンチマークとした。SPM モータは提案モータのステータと共通で、エアギャップ長も同一である。SPM モータの実機の無負荷誘起電圧から推定して、磁石の残留磁束密度はオーバハンク分を含め 0.5 T 、着磁方式はラジアル着磁とし、非コンシクエントポール構造のため、磁石の体積は提案モータの 2 倍である。

図 14 に 2 次元電磁界解析により計算した N-T 特性を示す。直流バス電圧は 48 V_{dc} とし、最大電機子電流は $8 A_{rms}$ (電流密度 10 A/mm^2) としている。SPM モータに比べコンシクエントポールモータは、最大トルクが約半分になるが、高速回転域が大幅に拡大されたことが確認できる。提案モータは低速回転域において、回転速度の増加とともにトルクが向上している。これは、ファラデーの法則により、I-coil に発生する起電力が回転速度に比例して大きくなり、界磁電流が増加するからである。提案モータの最大トルクは、コンシクエントポールモータに比べ 1.23 倍となった。また、高速回転域ではコンシクエントポールモータに比べ提案モータのトルクが若干小さくなった。次に、最大電機子電流が $12 A_{rms}$ (電流密度 15 A/mm^2) における N-T 特性の解析結果を図 15 に示す。 $8 A_{rms}$ と比較して高速回転域でもトルク特性がベンチマークを上回っている。

以上のことを最大の減磁起磁力を与えたときの最小 d 軸

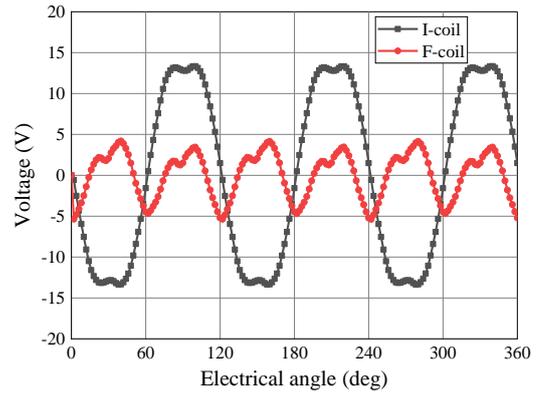


図 11 I-coil と F-coil における誘起電圧
Fig. 11. Induced voltages on I-coil and F-coil.

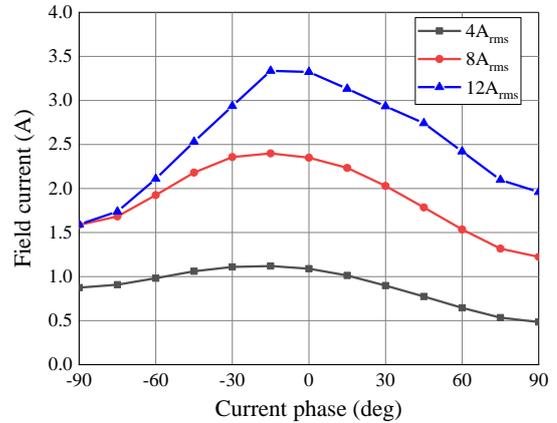
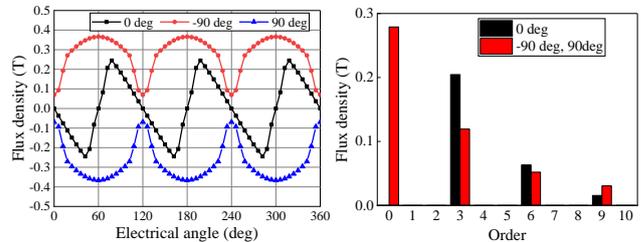


図 12 電流位相-界磁電流特性

Fig. 12 Current phase-vs.-field current characteristics.



(a) Armature flux fluctuation. (b) Harmonic contents.
図 13 d 軸における電機子磁束変動と調波解析結果

Fig. 13 Armature flux fluctuation on d -axis and its harmonic contents.

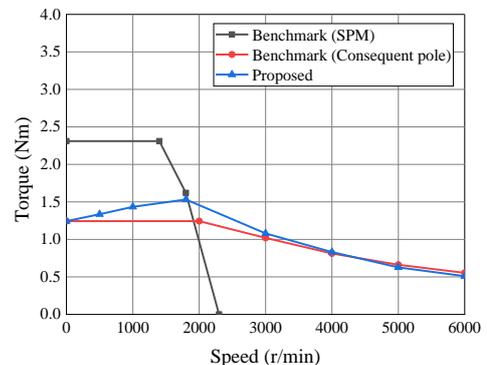


図 14 最大電機子電流 $8 A_{rms}$ における N-T 特性

Fig. 14. N-T characteristics under maximum current $8 A_{rms}$.

鎖交磁束 Ψ_{dmin} から考察する。 Ψ_{dmin} は以下の(1)で表される。

$$\Psi_{dmin} = \Psi_a - L_d I_{am} \quad (1)$$

ここで、 Ψ_a は磁石鎖交磁束、 L_d は d 軸インダクタンス、 I_{am} は dq 軸座標における電流制限値である。各パラメータを解析により求め Ψ_{dmin} を計算した。各パラメータと Ψ_{dmin} を表 2 に示す。提案モータでは、F-coil による界磁があるため、コンシクエントポールモータに比べ Ψ_a が大きくなっている。提案モータは I_{am} が 13.9 A のとき、 Ψ_{dmin} がコンシクエントポールモータに比べ大きく、高速回転域の特性が悪くなることを確認できる。しかし、 I_{am} を 20.8 A にすると、提案モータの Ψ_{dmin} が小さくなり、高速回転域の特性が改善されることがわかる。以上より、提案モータは Ψ_{dmin} が 0 に近いもしくは 0 以下に設計することで、自動可変界磁機能により出力の拡大が見込める。

表 2 各パラメータと Ψ_{dmin}

Table 2. Each parameter and Ψ_{dmin} .

	Benchmark (Consequent pole)		Proposed	
I_{am} (A)	13.9	20.8	13.9	20.8
Ψ_a (Wb)	0.015		0.019	0.020
L_d (mH)	1.0			
Ψ_{dmin} (mWb)	1.1	-5.8	5.1	-0.8

4. 実機試作と基礎検証

〈4.1〉 実機試作 図 16 に試作機を示し、表 3 に試作機の仕様を示す。モータケース背面はロータ巻線整流回路を結線するため、溝を施し、結線しやすい設計とした。シャフトの材料は S45C であり、フランジは非磁性体の SUS304 とすることで、ステータとシャフトは磁氣的に絶縁されている。ロータコアは接着積層された分割コアとし、ロータコアとモータケース接合部には突起と溝を備え、接合強度を高める設計とした。I-coil と F-coil の巻線を巻くときには、厚さ 0.5 mm のボビンを用いて、ロータコアと巻線間の絶縁を施した。銅線は素線径 $\phi 0.8$ mm、エナメル被覆の厚さ 0.08 mm の AIW 巻線を使用した。I-coil の巻数は 24 T で占積率は 40 % であり、F-coil の巻数は 46 T で占積率は 42 % であった。ロータ巻線整流回路に用いるダイオードは、新電元工業製のショットキーバリアダイオードブリッジ RBA-406B (耐圧 60 V、定格電流 4 A) を使い、モータケースをヒートシンク代わりとしてねじ止めして取り付けられている。ロータ巻線整流回路の結線では、取り外し可能なコネクタを用いて結線しており、整流回路の変更が可能である。

表 3 試作機の仕様

Table 3. Specifications of proposed motor.

Stack length of I-coil rotor core	29 mm
Stack length of F-coil rotor core	36 mm
Residual magnetic flux density	0.39 T
Magnetic coercivity	185.7 kA / m
Average I-coil resistance	70 m Ω / coil
Average F-coil resistance	203 m Ω / coil

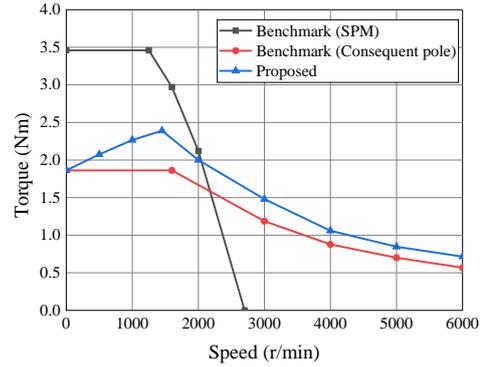
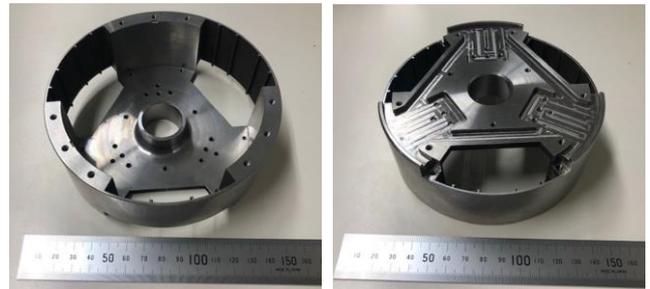


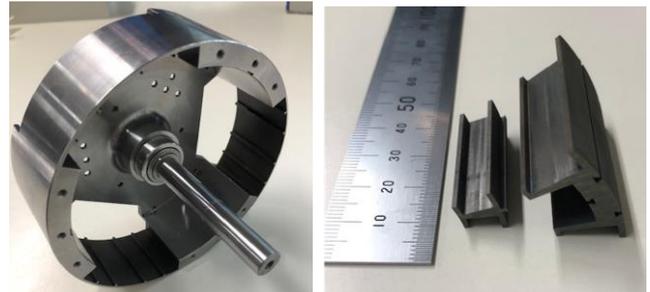
図 15 最大電機子電流 12A_{rms} における N-T 特性

Fig. 15. N-T characteristics under maximum current 12 A_{rms}.



(a) Front view of rotor yoke.

(b) Back view of rotor yoke.



(c) Rotor yoke with shaft.

(d) Segmented rotor cores.



(e) Rotor core assembly.

(f) Rotor assembly.



(g) Rotor winding connection.

(h) Rotor and stator.

図 16 試作機

Fig. 16. Prototype.

〈4・2〉 基礎検証 図 17 に試験環境を示す。Myway プラス製の汎用インバータを用いて、試作機をベクトル制御した。キャリア周波数 10 kHz, 直流バス電圧 50 V_{dc}, 電機子電流 8 A_{rms}としたときの回転速度 2000 r/min までの N-T 特性を図 18 に示す。図 18 より、コンシクエントポールモータは回転速度に対してトルクが一定であるのに対し、提案モータは回転速度の増加とともにトルクが向上していることが確認できる。図 18 を 2D 電磁界シミュレーション結果の図 14 と比較すると、全体的にトルクが小さくなった。誤差要因として、磁石の残留磁束密度がシミュレーション時の値より 0.01 T 低くなったことや、ロータ巻線やステータとの、公差による干渉を避けるため、磁石を若干小さく設計しており、磁石体積が小さくなったことなどが考えられる。さらに分割ロータコアをワイヤ放電加工したことによる磁気特性の劣化も考えられるが、詳細な分析は今後の課題とする。

試作機は電流位相-10 deg 近傍に MTPA 点があることを確認した。1 極対毎にイメージポールがあるロータ構造により、順突極の突極性となることが確認できた。

5. まとめ

本稿では、新たな磁気回路トポロジーに基づく第 2 次空間高調波を利用した自動可変界磁モータを提案し、電磁界シミュレーションによる性能予測および、実機基礎検証による自動可変界磁の確認を行った。特長として磁気回路はイメージポールを 1 極対毎に形成する構造とし、従来の自動可変界磁技術に対して、簡素な整流回路結線を可能とした。また、イメージポールである鉄極は 3 本のティースを備える構造とし、第 2 次空間高調波を効率よく I-coil に鎖交させることができた。シミュレーションでは、次の 3 つの自動可変界磁機能を示した。

- ・電機子電流を増加させると界磁起磁力が大きくなる。
- ・電流位相を進角させると界磁起磁力が小さくなる。
- ・回転速度を増加させると界磁起磁力が大きくなる。

これらの特性をもつ提案モータは、低速、中速回転域においては巻線界磁によるトルク増加により出力が拡大できることを確認し、高速回転域では Ψ_{dmin} を 0 に近い設計にすることで出力を拡大できることを確認した。実機検証では、回転速度の増加によるトルクの向上を確認した。以上より、新たな磁気回路トポロジーによる自動可変界磁を実現できた。

今後は、効率マップの実測等を行い、詳細な駆動特性を明らかにする。また本稿で得られた知見に基づき、提案モータの最適検討を行っていく所存である。

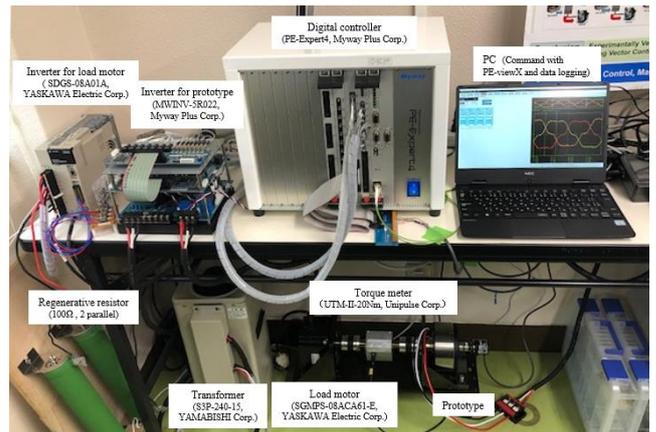


図 17 試験環境

Fig. 17. Experimental set up.

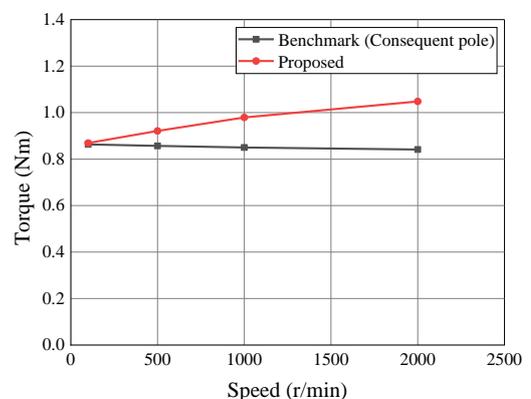


図 18 試作機の N-T 特性

Fig. 18. Measured N-T characteristics of prototype.

文 献

- (1) 堺和人・結城和明・橋場豊・高橋則雄・安井和也・ゴウウツィンランシーリット:「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) 小坂卓・尾関慧・松井信行:「自動車用高効率ハイブリッド界磁モータの運転特性」, 日本 AEM 学会誌, Vol.24, No.3 pp.246-251 (2016)
- (3) 岩間清大・野口季彦・青山真大:「ネオジム磁石を使用した透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータの基礎検討」, H31 年電気学会産業応用部門大会, No.3-7 pp.III-159-162 (2019)
- (4) 青山真大・野口季彦:「コンシクエントポール形自動的可変界磁 PM モータの駆動特性」, H30 年電気学会全国大会, No.5-27 pp.47-48 (2018)
- (5) 青山真大・野口季彦:「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」, 電学論 D, Vol.135, No.8 pp.869-881 (2015)
- (6) MITSUBA 製 CQ ブラシレスモータ
URL: <https://www.mitsuba.co.jp/scr/products/moter-kit>