

両面空間高調波を利用したパンケーキ アキシアルエアギャップ形磁石フリーモータの実機基礎検証

青山 真大 (静岡大学/スズキ), 野口 季彦, 李志剛* (静岡大学)

Preliminary Experimental Verification of Pancake-Type Axial-Air-Gap Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Double Sided Space Harmonics

Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation),
Toshihiko Noguchi, Ri Shigou (Shizuoka University)

This paper describes a pancake-type synchronous motor where the space harmonic power is effectively utilized for the field magnetization instead of the permanent magnets. The pancake axial-air-gap structure, i.e., a single back-yoke-less stator with a double-sided rotor configuration, can take great advantage to improve the mutual inductance which is indispensable for the self-excitation of the field windings. The rotor coils, which are composed of two types, i.e., an induction coil for induced electromotive force generation from the space harmonics, and a field coil for the field magnetization, are connected via a center-tapped full-bridge diode rectifying circuit. The adjustable speed drive characteristics are experimentally verified with a prototype motor. In addition, it is experimentally clarified that the self-excited electromagnet pole has passive variability of the field magnet function with respect to the rotation speed and the phase angle.

キーワード : アキシアルエアギャップ, 磁石フリー, 巻線界磁, 自己励磁

Keywords : axial-air-gap, permanent-magnet-free, wound-field, self-excitation

1. はじめに

近年, 欧州を中心としてローエンドなハイブリッドシステムとして, 48V 電源に基づくマイルドハイブリッドシステムが注目されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。既存のマイルドハイブリッドは他励式クローポール形オルタネータの出力を上げてベルト駆動するタイプや, 低電圧大電流で設計した IPMSM が採用されている⁽⁵⁾。しかし前者の場合, ロータ界磁コイルが他励式のため界磁調整でき低電圧駆動に適しているが, 一方で鉄塊状のクローポールロータの渦電流損によるモータ効率低下やブラシが必要という課題がある。後者の場合, 永久磁石による固定界磁のため低電圧駆動する場合は基底回転速度を高速回転側にシフトした設計を行う必要があり高効率エリアが高速回転側となる。そのため, マイルドハイブリッドで電氣的に動力補助を行いたい低速回転側でモータ効率が低下する。ギアを用いて減速駆動させる場合も小形で安価なハイブリッドシステムのメリットを十分に活かすことができない。それらの問題を解決するためには非ベルト駆動, ブラシレスで且つ可変界磁機能を有し, 高トルク密度なモータが望まれる。筆者らは既にバックヨーク

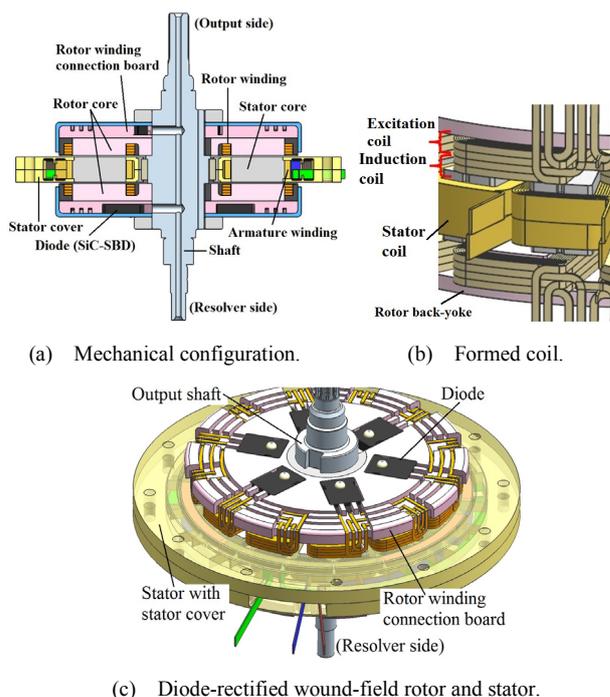


Fig. 1. Mechanical configuration of proposed motor.

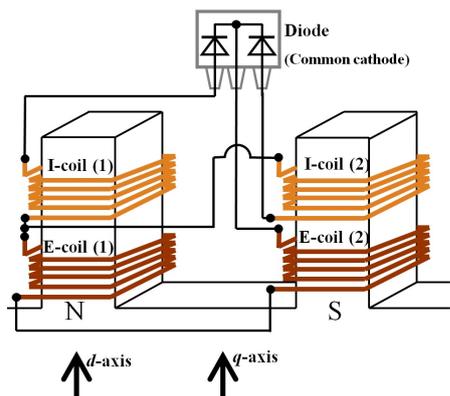


Fig. 2. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.



Fig. 3. Flat angle alpha windings.

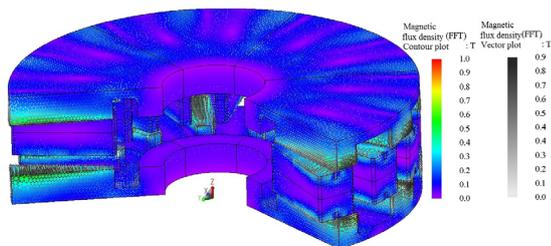


Fig. 4. Third time harmonic vector and magnetic flux density.

レスステータの両面をダイオード整流形巻線界磁ロータで挟み込んだ構造とすることで、ステータ両面に発生する空間高調波を界磁エネルギー源として活用できる磁石フリーモータを提案した⁶⁾。本稿では、原理検証用試作機を用いてパッシブな可変界磁機能と可変速トルク特性の基礎検証を行ったので報告する。

2. パンケーキ形自励式巻線界磁モータの構造

図 1 に示すように提案するモータは三相 18 スロットを有するバックヨークレス構造の集中巻ステータをもち、その両側を 12 極の突極を有する 2 つのロータで挟み込むパンケーキ形両面アキシャルエアギャップ構造を採用している。このモータは三次元磁路を有するため SMC コア（ヘガネス製 Somaloy）を用いる。ロータ巻線には図 2 に示すように全波整流回路パターンを結線するため樹脂（PPS 製）のボードを配置して一極対ごとに結線する。樹脂枠（PPS 製）で固定されたステータは樹脂封入して一体化したのち、ステータカバーを介してモータハウジングに取り付ける構造としている。一方、ロータは図 3 に示すように α 巻成形したコイルを用いることでコイル占積率の向上とアキシャルギャップ面に引き出し線のデッドスペースが発生することを防いでいる。ステータコイルも同様に α 巻している。また、ステー

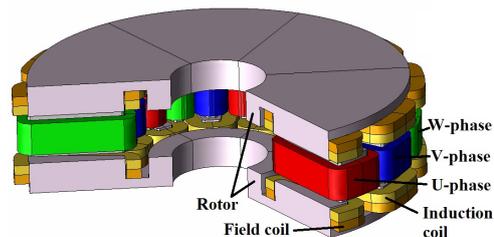


Fig. 5. FEA model.

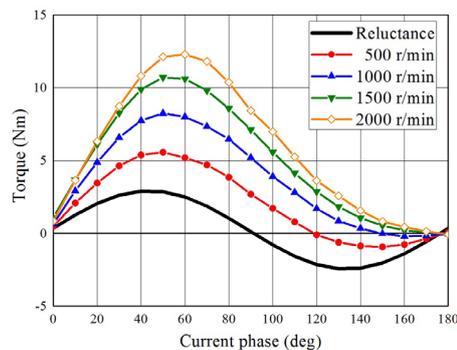


Fig. 6. Adjustable speed drive torque characteristics simulated by FEA.

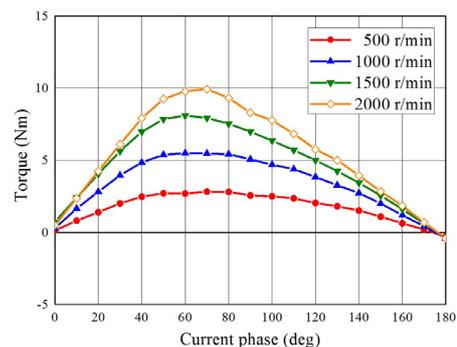


Fig. 7. Adjustable speed drive E-coil torque characteristics.

タをバックヨークレス構造とすることで、図 4 に示す電磁界解析結果から、両面に発生する漏れ磁束を効果的に 2 つのロータ突極部に鎖交させ得ることを確認できる。両面ロータは N 極と S 極がアキシャル軸方向に対面するように配置する。これにより 2 つのギャップを介した直列磁気回路が形成されるため、バックヨークレスステータ構造でも磁気回路が成立する。

3. 電磁界解析による性能予測

図 5 に FEA モデルを示す。図 5 は機械角 240 度であるが、実際に解析を行う際は機械角 60 度（電気角一周期）で軸方向はフルモデルで解析を行った。なお、JSOL 社の電磁界シミュレーションソフト JMAG-Designer (ver. 14) により解析した。図 6 に電磁界解析により計算した最大負荷（電機子起磁力：700 A_{rms}T）における可変速特性を示す。電機子起磁力の上限は最大負荷駆動時間と冷却性能により定まる電機子電流密度から決めている。なお、電流位相基準は d 軸（ロータ N 極と U 相を位相合わせ）である。電磁界解析では

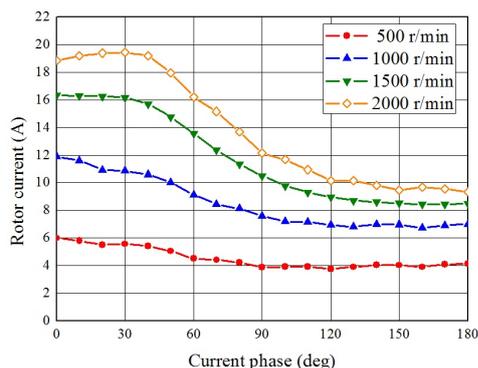


Fig. 8. Field current with respect to rotation speed under 700 A_{rms}T.

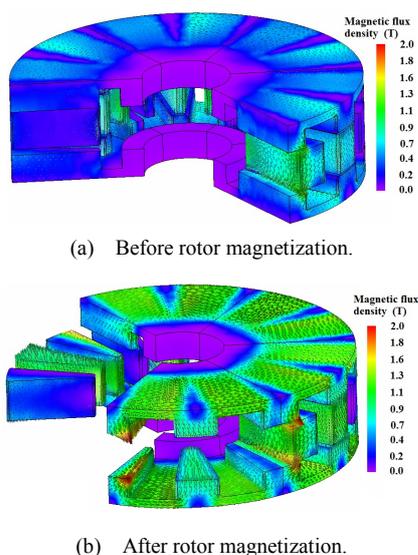


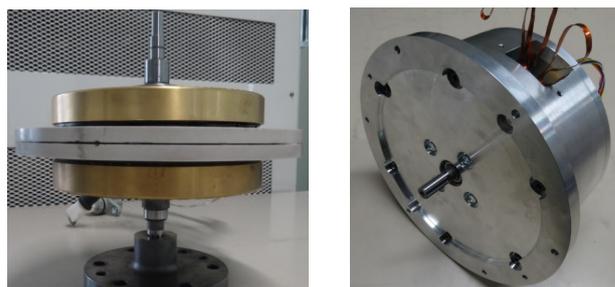
Fig. 9. Magnetic flux density and vectors for 1000 r/min.

モータ制御に起因して発生する時間高調波を考慮せずに純正弦波電流源を想定して解析を行った。損失については電機子巻線及びロータ巻線で発生する銅損、ステータならびにロータの鉄心、更にはダイオードによる損失も予測されるが、今回はステータとロータの銅損のみを考慮した。鉄損については解析精度向上の検討も踏まえて今後の課題とする。リラクタンストルクはロータ巻線を開放状態で計算した値である。図 7 に図 6 のダイオード整流した場合のトルクからリラクタンストルクを減じて求めた電磁石トルク特性を示す。同図より、電磁石トルクの電流位相-トルク特性は正弦波関数となることがわかる。図 8 に電流位相角に対する各回転速度時のロータ巻線界磁電流平均値をプロットした図を示す。同図より、電流位相角によってロータコイルに鎖交する第 2 次空間高調波の鎖交磁束量が変わるため界磁電流が変化することがわかる。以上の電磁界解析結果より、自励式巻線界磁モータは回転速度に対してパッシブな可変界磁機能を有していることがわかる。図示していないが、回転速度一定でステータ起磁力を変えたときも基本波回転磁界に重畳する第 2 次空間高調波振幅が変化するため、ロータコイルに発生する誘導起電力が変化し、電磁石トルクに影響を及ぼす。すなわち、提案するモータ



(a) Wound-field rotor with resin mold.

(b) Stator with stator cover.



(c) Single stator and double sided rotor.

(d) Motor assy.

Fig. 10. Prototype machine.

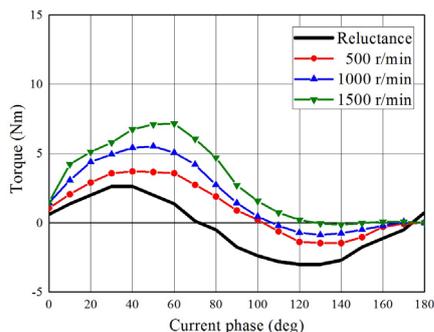
Table 1 Specification of prototype machine.

Number of rotor poles	12
Number of stator slots	18
Motor core outer diameter	120 mm
Air gap length	0.7 mm
Axial length of core	34 mm
Maximum current	63.6 Arms
Number of stator coil-turn	11
Winding connection	6 series
Number of rotor induction coil	21
Number of rotor field coil	21

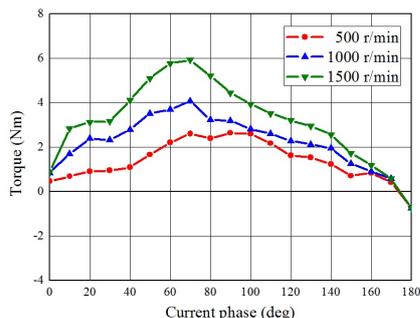
は回転速度と電機子電流、電流位相角に対してパッシブな可変界磁機能を有していると言える。図 9 に 1000 r/min、最大負荷にて駆動したとき、自励によりロータが磁化する前後の磁束密度分布と磁束密度ベクトル図を示す。自励によりロータが磁化する時間はロータ巻線インダクタンスと巻線抵抗に依存する電氣的時定数で決まる。

4. 試作機の概要

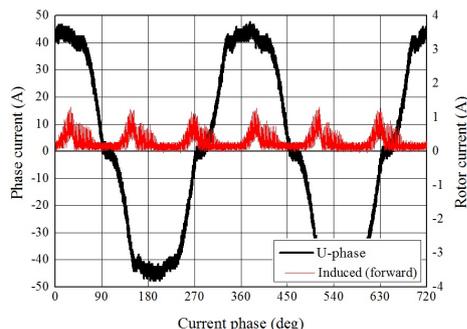
図 10 に原理検証用の試作機を示す。SMC コアは円柱形状のヘガネス製プロトタイプ材 ($\phi 120$, L20) から切削加工で切り出し、エッジ部分は精度を出すために放電加工を施した。図 3 に示す α 巻成形したコイルをロータティースに取り付け、図 2 のように結線したのち、真空炉で樹脂 (PPS) 封入を行い絶縁の確保と機械強度の向上を図った。ステータは面振動による機械強度の低下を防止するため、内輪部分に補助用のアンギュラ軸受を内包している。表 1 に試作モータの主要諸元を示す。整流用の SiC ダイオードはローム製 SCS230AE2 ($V_R=650$ V, $I_F=15$ A/leg) である。



(a) Adjustable speed drive torque characteristics (measured).



(b) Adjustable speed drive E-coil torque characteristics.



(c) Stator and rotor current waveforms for 500 r/min.

Fig. 11. Experimental test results.

5. 基礎実験

汎用インバータとロータ電流を測定するためのスリップリングを用いて一極対分のダイオード結線部分を測定できるようにした試作モータを用いて基礎実験を行った。キャリア周波数を 10 kHz とし、電機子起磁力 $700 \text{ A}_{\text{rms}} \text{T}$ で可変速トルク特性を測定した結果を図 11(a)に示す。図 11(b)は図 11(a)のダイオード整流した場合のトルクからリラクタンストルクを減じて求めた電磁石トルク特性を示す。なお、試験環境の都合上、1500 r/min をモータ回転速度の上限としている。リラクタンストルクはロータ巻線を開放状態で測定した値である。図 11(a)よりリラクタンストルクにオフセットが見られるが、リラクタンストルクの場合、二重突極構造に起因した第 5 次、第 7 次空間高調波が増加することでトルクリプルや電流波形にひずみが生ずる。さらにアキシアルギャップ構造特有の扇形トルク発生面に起因した径方向の磁気抵抗分布差による電磁振動が大きいことが原因として考えられる。図 6、図 7 の電磁界解析結果と図 11(a)

と(b)の実測結果を比較すると実測のほうが低い結果となっている。解析で鉄損を考慮していないということに加えて、SMC コアの磁気特性のモデリングが不十分な可能性がある。SMC プロトタイプング材を切削加工のみで仕上げるとエッジ部分が脆く崩れてしまった。前述のとおり、これを回避するためエッジ部分は放電加工している。この加工処理により SMC コアの粒子間の絶縁性能が著しく劣化し、透磁率の低下と鉄損が増加したと考えられる。特に自励エネルギー源となる第 2 次空間高調波に対しては、絶縁性能劣化に伴い渦電流が増大し、磁気遮蔽効果により磁束が十分ロータティース部分に鎖交していないことが考えられる。これらの考察と対策については今後の課題とする。図 11(a)と(b)より回転速度によるトルクの依存特性を確認することができる。すなわち、提案モータは回転速度と電機子起磁力、電流位相角に対してパッシブな可変界磁機能をもっている。図 11(c)に一例として 500 r/min、40 Arms の条件下で電機子電流 (U 相) とロータ順方向誘導電流を測定した結果を示す。同図より、基本波電角一周期に 3 倍調波の誘導電流が鎖交しており、静止座標系における第 2 次空間高調波 (基本波回転座標系で観測すると第 3 次時間高調波) により自励できていることが確認できる。誘導電流に高周波ノイズが重畳しているが、モータ電磁振動による影響だと考えられる。

6. まとめ

本稿では、既提案のパンケーキアキシアルエアギャップ形磁石フリーモータについて原理検証機の試作を行いバックヨークレス構造のステータ両面に配置したロータで空間高調波により自励してトルク向上が可能であることを実機で確認した。今後は、SMC コアの加工方法による磁気特性劣化の影響を明らかにしたうえで、加工方法の見直しによりトルク密度の向上を図る。また、電磁振動とトルクリプル低減の検討を行い、1500 r/min 以上の回転速度における評価を行う。さらに、同体積のラジアルギャップ形自励同期モータに対する優位性を実機評価で明らかにする予定である。

文 献

- (1) Uli Christian Blessing: "48 V: How much hybridization is possible with the new vehicle power?", *14 th International VDI Congress*, GETRAG company (2014)
- (2) 寺谷達夫: 「自動車 (EV, PHEV) の 25 年後」, 電学誌, Vol. 134, No.2, pp. 68-71 (2014)
- (3) Derek de Bono: "Fuel Efficient Cars: Good for the Economy? The Impact of CO2 legislation", *Valeo technical report*, Dec. 2012 (2012)
- (4) Markus Kremer and Thomas Hulshorst: "In-Market Application of Start-Stop System in European Market", FEV final report, Dec. 2011 (2011)
- (5) 小島洋幸: 「スズキにおけるアイドリングストップ開発の取り組み」, H27 年電気学会全国大会, 4-S19-5, pp. 16-19 (2015)
- (6) 青山真大・中島一清・野口季彦: 「両面空間高調波を利用したパンケーキアキシアルエアギャップ形磁石フリーモータ」, H27 年電気学会全国大会, 5-039, pp.72-73 (2015)