

## HEV 用磁石フリー磁気ギアモータの試作機設計

青山 真大 (静岡大学/スズキ), 久保田 芳永\* (スズキ), 野口 季彦, 本橋 勇人 (静岡大学)

### Prototype Design of Permanent-Magnet-Free Magnetic Geared Motor for HEV Application

Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation), Yoshihisa Kubota (SUZUKI Motor Corporation),  
Toshihiko Noguchi, Yuto Motohashi (Shizuoka University)

This paper describes a magnetic geared motor in which magnetic flux variation at a differential frequency between the stator rotating magnetic field and the rotor speed is effectively utilized for the field magnetization instead of the rare-earth permanent magnets. The operation principle of the self-excitation with a diode rectifier incorporated by the rotor winding circuit is discussed in the paper. A magnetic circuit design and a mechanical design of a downsized prototype were performed for the purpose of principle verification. In addition, the adjustable speed drive characteristics of the proposed motor are investigated by the FEM analysis.

キーワード：磁気ギアモータ, 磁石フリー, 巻線界磁, 自己励磁, ダイオード整流, 差分周波数

Keywords : magnetic geared motor, permanent-magnet-free, wound-field, self-excitation, diode rectifier, differential frequency

### 1. はじめに

近年, パワースプリット式 HEV パワートレインの小型化のために磁気ギアモータを用いたシステムが提案されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。従来の遊星ギアとモータを組み合わせたシステムに対して二軸出力の磁気ギアモータを採用することで複合機能化により部品点数を削減することができ, 小型化, 軽量化, システム効率の向上を期待できる。しかし, ステータ側の回転磁界とロータの回転周波数が非同期で駆動する条件下では永久磁石 (PM) に対する外部磁場の磁気変動が大きくなり, 高保磁力磁石を用いる必要や磁石渦電流損対策が必要になる。それらの課題に鑑み, 筆者らは損失増加の主要因になっていた磁気ギアモータの非同期駆動 (非同期回転モード) に着目した自励式巻線界磁形磁気ギアモータを提案した<sup>(4)</sup>。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って得られる励磁電流を利用することで磁石フリー化を実現している<sup>(5)</sup>。現在, 提案モータの自己励磁動作を検証するために原理検証用試作機の設計と二軸制御のための最適な制御モデル構築を進めている。本稿では, 原理検証用試作機の磁気回路設計と構造設計について報告する。

### 2. 磁気回路設計

#### 〈2・1〉インナーロータに鎖交する非同期回転磁界

測定環境の都合上, ステータコア外径が $\phi 120$  mm, 積厚が

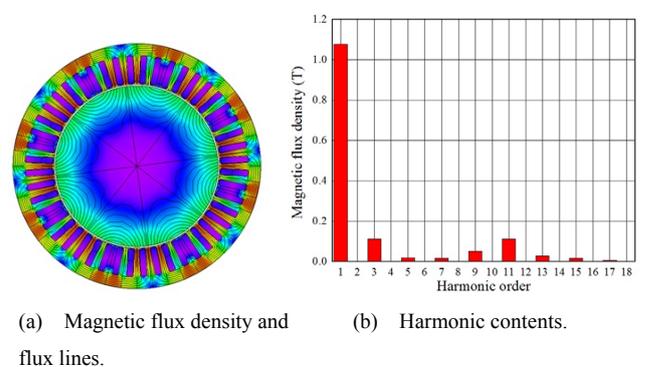


Fig. 1. Magnetic flux density and its harmonic contents of solid inner-rotor without magnetic flux modulator.

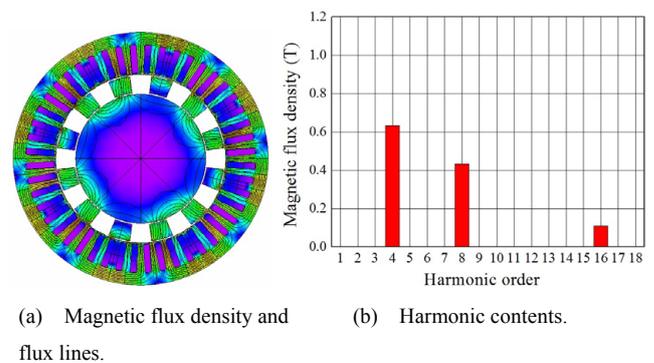


Fig. 2. Magnetic flux density and its harmonic contents of solid inner-rotor with magnetic flux modulator.

49.5 mm の小型原理検証機を試作し、差分周波数でロータを自己励磁することを検証する。コア外径の制約、冷却系、最大トルク駆動時間から決定した電機子巻線の電流密度 ( $23 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$ ) の条件から、最大負荷時の磁気飽和を考慮してステータは 8 極 (4 極対) と決定した。磁気変調形磁気ギアモータのポールコンビネーションは(1)が成り立つように選定する<sup>(1)(2)(3)</sup>。また、共線図の関係からトルクは(2)が成り立つ<sup>(1)(2)(3)</sup>。

$$P_m \omega_m - P_{pm} \omega_{pm} = P_s \omega_s \quad (1)$$

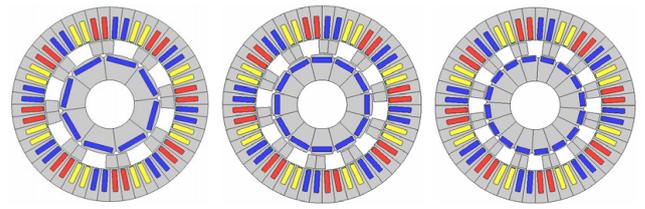
$$T_s = -\frac{P_s}{P_m} T_m = \frac{P_s}{P_{pm}} T_{pm} \quad (2)$$

ここで  $\omega_s$  はステータ回転磁界角速度、 $\omega_m$  は変調子角速度、 $\omega_{pm}$  は PM ロータ角速度、 $P_s$  はステータ極対数、 $P_m$  は変調子の極数、 $P_{pm}$  は PM ロータ極対数であり、 $T_s$  はステータ反作用トルク、 $T_m$  は変調子トルク、 $T_{pm}$  は PM ロータトルクである。上記の関係から一例として変調子の極数  $P_m = 12$  としたとき、 $P_s = 4$  であるから、 $P_{pm} = 8$  となる。このポールコンビネーションを採用した場合のロータ鎖交磁束を図 1 と図 2 に示す。まず、ソリッドロータを内包した分布巻ステータにより発生するギャップ磁束密度波形を調波解析した結果を図 1 に示す。図 1 よりスロット高調波に起因する第 11 次と第 13 次空間高調波等がギャップ磁束に重畳しているが比較的正弦波に近い。次に、分布巻ステータとソリッドロータ間に変調子 ( $P_m = 12$ ) を内包したときの変調子とソリッドロータ間のギャップ磁束密度波形を調波解析した結果を図 2 に示す。図 2 より変調子のパーミアンス分布によりステータの基本波回転磁界が磁気変調されて 8 次 ( $P_m - P_s = 8$ ) の回転磁界が発生し、この 8 次の回転磁界と 8 極の PM ロータが同期して回転する。なお、磁気変調により 16 次 ( $P_m + P_s = 16$ ) も発生するが振幅が小さいため、一般に低次側の回転磁界と PM ロータを同期させる<sup>(2)</sup>。一方、図 2 で確認できるように 4 次の回転磁界 (4 極対ステータの基本波回転磁界) もロータに鎖交するが、これは PM ロータと同期しないため従来の PM ロータにとっては渦電流損を大幅に増加させる主要因となる。提案するダイオード整流式巻線界磁形磁気ギアモータは、この非同期周波数の磁束変動により誘導起電力を得てダイオード整流により自励式電磁石を形成する。これにより従来の磁気ギアモータと同様の動作原理で磁石フリー化を実現することができる。

〈2-2〉ポールコンビネーションの検討  $P_s = 4$  の場合、磁気飽和を考慮して下記の組み合わせが考えられる。

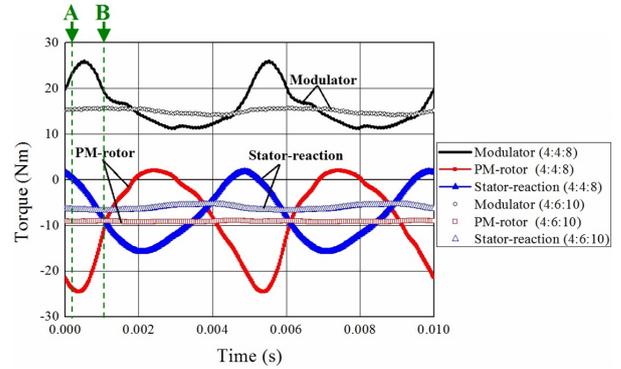
$$(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:4:8), (4:6:10), (4:8:12)$$

上記の組み合わせにて従来の PM ロータタイプで磁気回路設計を行った結果を図 3 に示す。なお、4 極対のステータは共通とし、変調子の鉄心と空隙の比率は電磁界解析を通じた平均出力トルクとトルクリプルの関係から 50 % (空隙と鉄の比率が等しい状態) とした。図 4(a)に示すように ( $P_s :$

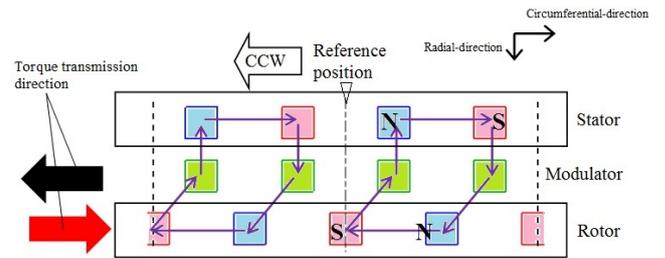


(a)  $P_s = 4, P_{pm} = 4, P_m = 8$ . (b)  $P_s = 4, P_{pm} = 6, P_m = 10$ . (c)  $P_s = 4, P_{pm} = 8, P_m = 12$ .

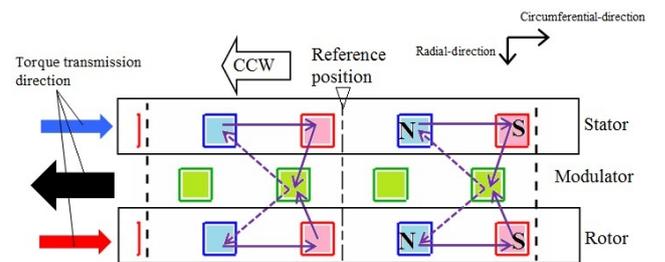
Fig. 3. Poles and slots combinations.



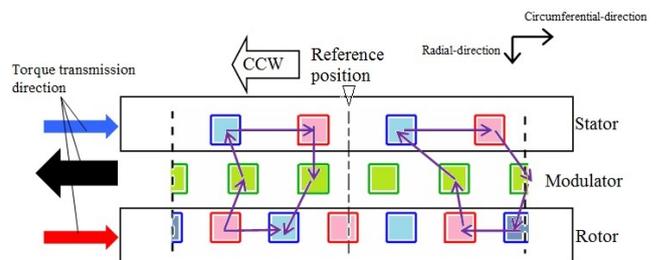
(a) Torque characteristics under stator 100 Hz in CW-direction and WF-rotor 100 Hz in CCW-direction.



(b) Main magnetic flux paths and torque direction at moment A of 4:4:8 slot combination.



(c) Main magnetic flux paths and torque direction at moment B of 4:4:8 slot combination.



(d) Main magnetic flux paths and torque direction at moment B of 4:6:10 slot combination.

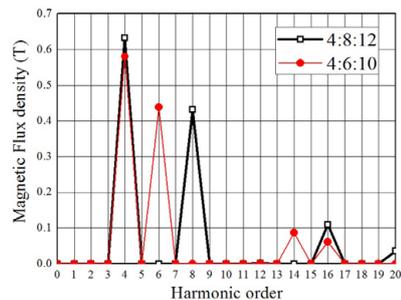
Fig. 4. Torque delivery principle with respect to slot combinations.

$P_{pm} : P_m = (4:4:8)$  の場合、トルクリプルが大幅に増加する。このポールコンビネーションの場合、図 4(b), (c) に示すように 2 つのロータ位置によってはトルク (周方向電磁力) が発生しない場合がある。一方、 $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:6:10)$  の場合は図 4(d) に示すように常にトルク (周方向電磁力) が発生する。同様に紙面の都合上図示していないが  $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:8:12)$  の場合も常にトルクが発生する。

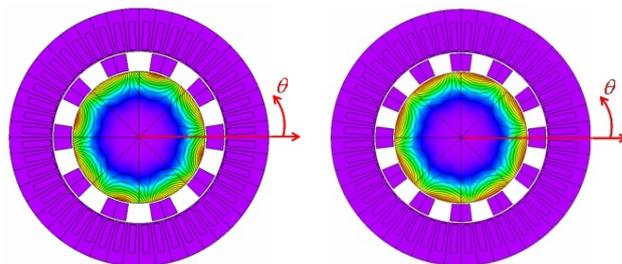
次に、 $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:6:10)$  と  $(4:8:12)$  の場合について、変調子とソリッドロータ間のギャップ磁束密度波形の調波解析した結果と差分周波数のロータ鎖交磁束分布を比較した結果を図 5 に示す。同図より、 $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:8:12)$  のほうが提案モータの界磁エネルギー源になるステータ回転磁界とロータ回転速度の差分周波数で変動する磁束振幅が大きく、ロータ表面磁束分布も比較的均等に分布することが確認できる。よって試作機は  $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:8:12)$  のポールコンビネーションを採用することとした。

**〈2・3〉ロータ巻線整流回路の検討** 提案モータは、図 6(a) に示すように差分周波数の磁束変動から誘導起電力を発生させる誘導コイルとその誘導起電力を整流したのちに界磁極を形成する界磁コイルをロータ突極部に備えた巻線界磁形構造である。カソードコモン形ダイオードモジュールを利用してより効率的に誘導起電力を整流するため、ロータ巻線を開放状態とし各誘導コイルに発生する誘導起電力の位相を考慮してコイル結線方法を決定した。図 6(b), (c) にロータ巻線を開放状態としたときに各誘導コイルに発生する誘導起電力を示す。同図より、同相の誘導コイル同士を直列接続し、逆相となる誘導コイル群をそれぞれカソードコモン形ダイオードモジュールで結線した。ロータ巻線の銅損増加による界磁電流の低下を防ぐため、図 7 に示すようなロータ巻線整流回路結線とした。ロータコイルは、図 8 に示すようにロータ巻線の絶縁保護と固定を兼ねたボギンを介してロータスロットに内包する構造であり、有効断面積に対して占積率 62% で誘導コイルを 10 T、界磁コイルを 11 T 巻いている。巻線抵抗値は誘導コイルが 79 mΩ/pole、界磁コイルが 47 mΩ/pole である。

**〈2・4〉電磁界解析による性能予測** 駆動モードの一例として図 9 に示すようにエンジンに軸結合される WF ロータ (巻線界磁ロータ) を、エンジン効率が良い 3000 r/min (ステータから見て 200 Hz) で一定回転させた場合と、5000 r/min (ステータから見て 333.3 Hz) で一定駆動させた場合を検討する。ステータ励磁周波数を CW 方向から CCW 方向まで最大負荷且つ、電流位相 0 deg (位相基準はロータ突極の  $d$  軸) の条件で変化させたときのドライブシャフトに直結した変調子の可変速トルク特性を図 10 に示す。参考に図 3(c) に示す同じポールコンビネーションの PM ロータ形磁気ギアモータの特性も示す。同図より、試作機は小径のため十分なロータコイルスペースを確保できず従来形に対してトルク特性が劣るが、フルモデルの場合は十分なロータスロット面積を確保できるためトルク差を縮小できると考えられる。また、差分周波数の磁束変動を界磁エネルギー源と



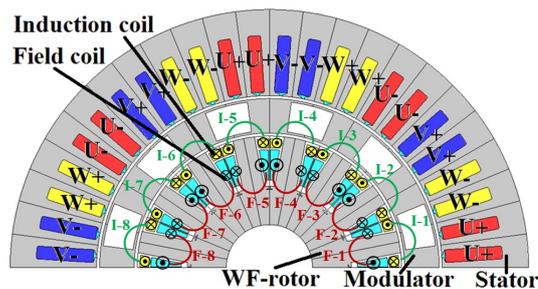
(a) Harmonic contents of magnetic flux density in air-gap.



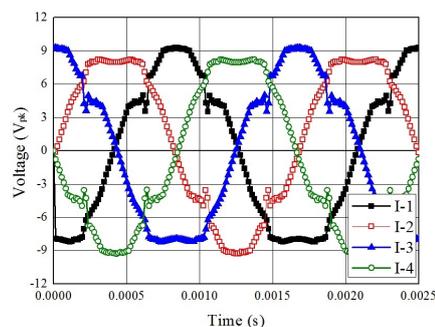
(b)  $P_s = 4, P_{pm} = 6, P_m = 10.$

(c)  $P_s = 4, P_{pm} = 8, P_m = 12.$

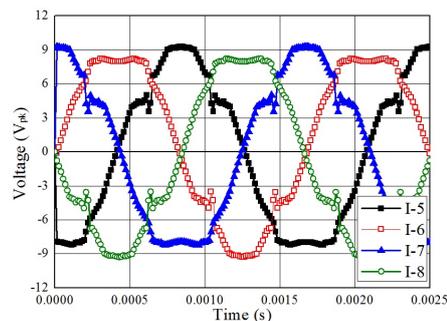
Fig. 5. Harmonic contents of magnetic flux density in air-gap and magnetic flux distribution in differential frequency.



(a) Cross section of proposed rare-earth-free magnetic geared motor.



(b) Induced voltage in induction coils I-1, I-2, I-3 and I-4.



(c) Induced voltage in induction coils I-5, I-6, I-7 and I-8.

Fig. 6. Proposed motor and induced voltage in each induction coil.

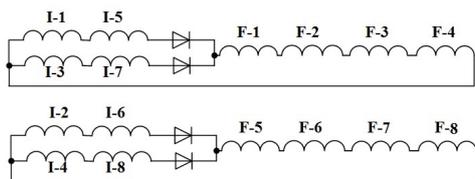


Fig. 7. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.

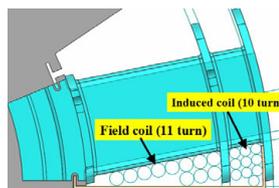


Fig. 8. Space factor of rotor windings.

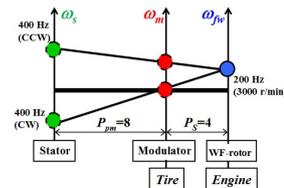


Fig. 9. Collinear chart under constant-speed drive of WF-rotor at 200 Hz.

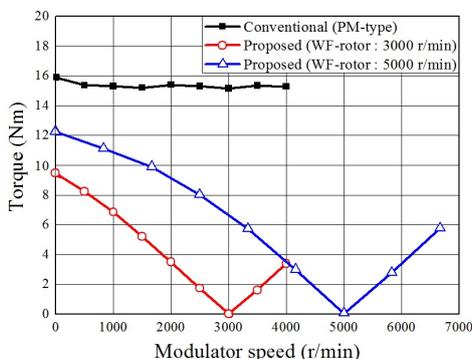


Fig. 10. Adjustable speed drive characteristics.

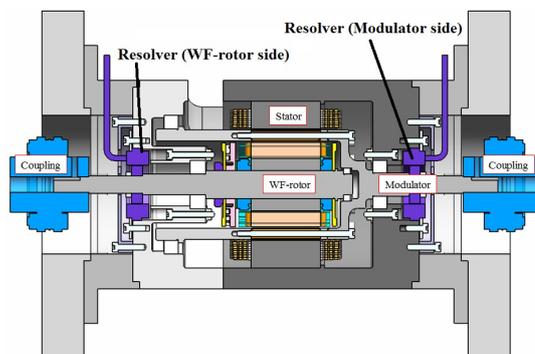


Fig. 11. Mechanical configuration (cross section).

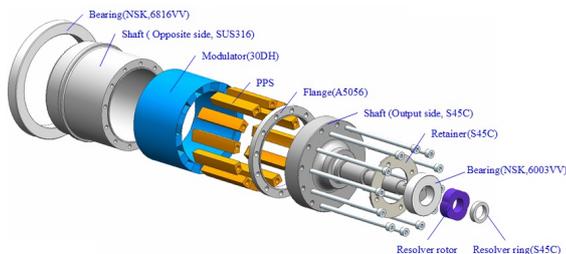


Fig. 12. Mechanical configuration of modulator.

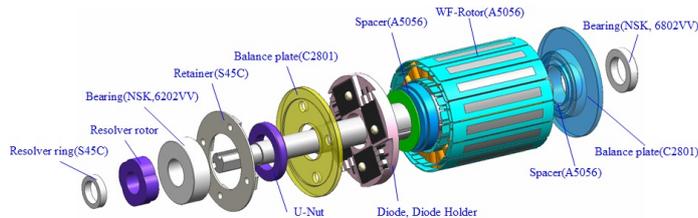


Fig. 13. Mechanical configuration of WF-rotor.

したダイオード整流形磁気ギアモータの場合、ステータ回転磁界とロータ回転速度差が小さくなるに依り、ロータ界磁巻線における誘導起電力が低下する。しかし、HEVモードで駆動する場合は高速巡航の運転領域になり、必要なトルクは比較的低くて済むため HEV システム全体を含めたシステム設計で改善の余地がある。一方、EV モード駆動の場合、ステータ励磁周波数を従来の PM ロータ形よりも高くして差分周波数による磁束変動を意図的に発生させる必要があり、効率低下が懸念される。差分周波数の磁束変動が低い駆動条件におけるトルク特性の改善は今後の課題である。

### 3. 原理検証用試作機の構造設計

全体構成は図 11 に示すようにステータに変調子 (outer-rotor) と WF ロータ (inner-rotor) を内包しており、独立して駆動できる二軸出力構造となっている。変調子と WF ロータそれぞれの位置情報をレゾルバで取得し、(1)を用いて算出したステータ角速度に電機子電流を同期させ制御する。変調子は図 12 に示すような構造であり、空隙部分に PPS 樹脂バーを内包させてトルク伝達している。WF ロータは図 13 に示すような構造であり、ロータコイルエンド上にスペーサーを介して整流回路用ダイオードを取り付ける。

### 4. まとめ

本稿では、磁石フリー磁気ギアモータの磁気回路と構造設計について検討した。電磁界解析の結果から、ステータコア外径が  $\phi 120$  mm の小型試作機では、 $(P_s : P_{pm} : P_m) = (4:8:12)$  のポールコンビネーションが最適であることを明らかにした。また、試作機の構造設計も行い、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と制御モデルの構築を進める予定である。

### 文 献

- (1) Y. Takeuchi, H. Kato, M. Tago, S. Ogasawara and H. Sakai: "Operating Principle and Control Method of the Magnetic Modulated Motor", *IEEJ Annual Meeting*, No. 5-041, pp.73-74 (2013)
- (2) M. Fukuoka, K. Nakamura, H. Kato and O. Ichinokura: "A Consideration of the Optimum Configuration of Flux-Modulated Type Dual-Axis Motor", *IEEJ Technical Meeting*, RM-13-141 (2013)
- (3) N. Niguchi and K. Hirata: "A Novel Magnetic-Geared Motor", *Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 21, No. 2, pp. 110-115 (2013)
- (4) M. Aoyama, Y. Kubota and T. Noguchi: "Proposal of Rare-Earth-Free Brushless Wound-Field Magnetic Geared Motor for HEV Application", *IEEJ Annual Meeting*, No. 5-037, pp.68-69 (2015)
- (5) M. Aoyama, 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)