

磁石フリー磁気ギアモータの HEV モード走行時の可変速運転特性

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)

Adjustable Speed Drive Performance of Permanent-Magnet-Free Magnetic Geared Motor under HEV Drive Mode

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 caused by the 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 magnetic circuit design and the mechanical design of a downsized prototype are presented for the purpose of principle verification. The adjustable speed drive performance under the HEV drive mode with engine speed and torque control is investigated by the FEM analysis. Consequently, it has been indicated that the output torque performance can be improve by controlling the differential frequency without sacrificing the total efficiency.

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

今日, 輸送機器を取り巻く環境として厳しい排ガス規制が課せられている。燃費向上のため, スタータージェネレータ (ISG) によるマイルドハイブリッド (マイルド HEV) システムからパワースプリット式 HEV システム (ストロング HEV) など様々な技術ポートフォリオが検討されている⁽¹⁾。その中でも近年, 内燃機関の運動エネルギーと電動コンポーネントによる電気エネルギーの動力を分担するパワースプリット式 HEV システムの小型化を目的に, 図 1 に示すような磁気ギアモータを用いたシステムが提案されている⁽²⁾。特に小型車両の場合, パワートレインの軽量化が燃費と動力性能向上に占める割合が大きい。一方で電動機に比べ低中速域のトルク特性が低いレシプロエンジンに対して, 電動化割合を増やすことで燃費改善につながる。それらの相反する要求に対して, 図 2 に示すように従来の遊星ギアおよびモータを組み合わせたシステムと等価な HEV システム構成を実現できる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

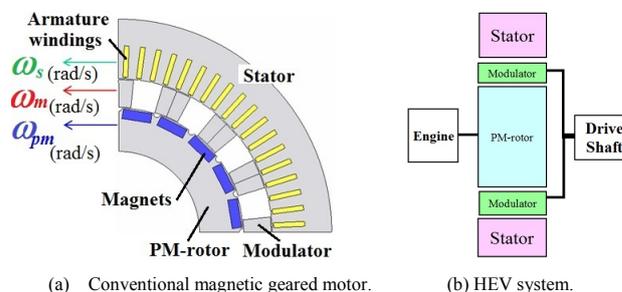


Fig. 1. Cross section of conventional magnetic geared motor and HEV system application.

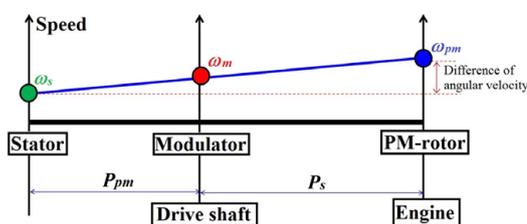


Fig. 2. Collinear chart of magnetic geared motor for HEV system.

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) に着目した自励巻線界磁形磁気ギアモータを提案した⁽³⁾。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⁽⁴⁾。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的设计

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最大出力制御時における可変速特性について検討したので報告する。

2. 原理検証用試作機の構造

測定環境の都合上、ステータコア外径が $\phi 120$ mm、積厚が 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。図 3 に提案モータの径方向断面図 (1/2 モデル) を示す⁽⁴⁾。同図に示すように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 (差分周波数磁束) 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 (Wound-Field) 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と界磁コイルに発生する誘導起電力の位相を考慮してコイルの結線方法を決定した。図 4 に示すようなロータ巻線の結線とし、ロータ巻線銅損増加による界磁電流の低下を防ぐために、整流回路を 4 セグメント化しており、図 4 の回路が 2 組設けられる。全体構造は図 5 に示すようにステータに変調子 (outer-rotor) と WF ロータ (inner-rotor) を内包させ、独立して駆動できる二軸出力をもっている。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⁽²⁾。また、共線図の関係からトルクは(2)が成り立つ⁽²⁾。

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

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

ここで ω_s はステータ回転磁界角速度、 ω_m は変調子角速度、 ω_{wf} は WF 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_{wf} は WF 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_{wf} は WF 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を $P_m = 12$ としたとき、 $P_s = 4$ であるから、 $P_{wf} = 8$ となる。表 1 に原理検証用試作機の主要諸元を示す。

3. HEV モード時の可変速特性

〈3・1〉エンジン回転制御時の変調子トルク特性 図 1(b)に示すように想定している HEV システムでは WF ロータはエンジンと直結されている。小型車用レシプロエンジンは 3000 r/min から 4000 r/min 間が高効率駆動領域であり、5000 r/min 以上になると大幅に燃焼効率が低下するため HEV モード時のエンジン最高回転速度を 5000 r/min とする。図 6

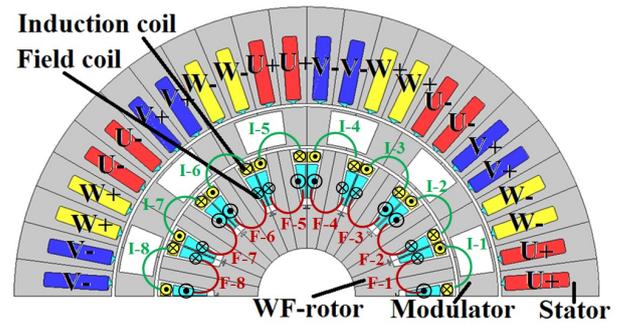


Fig. 3. Cross section of proposed permanent-magnet-free magnetic geared motor.

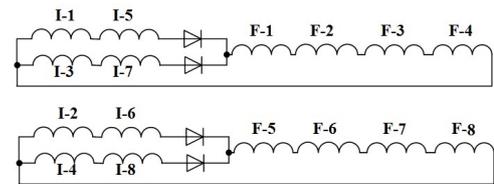


Fig. 4. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.

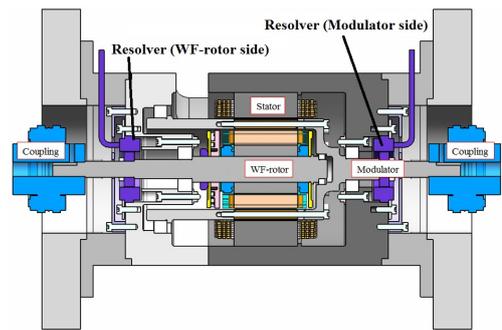


Fig. 5. Mechanical configuration (cross section).

Table 1. Specifications of prototype motor.

Number of stator poles	8
Number of WF-rotor poles	16
Number of modulator poles	12
Stator outer diameter	120 mm
Rotor diameter	61.2 mm
Axial length of core	49.5 mm
Air gap length	0.7 mm
Maximum current	150 A_{rms}
Armature winding resistance	15.1 $\text{m}\Omega$ / phase
Number of armature coil-turn	8
Winding connection	4 series - 2 parallel
Number of I-coil turn	10
Number of F-coil turn	11
I-coil resistance	79 $\text{m}\Omega$ / pole
F-coil resistance	47 $\text{m}\Omega$ / pole
Thickness of iron core steel plate	0.3 mm (30DH)

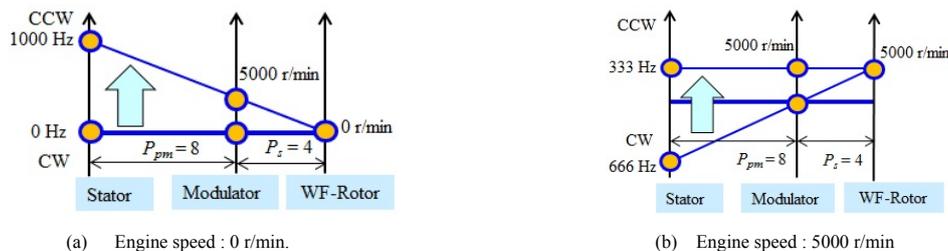


Fig. 6. Collinear chart with respect to engine speed and stator excitation frequency.

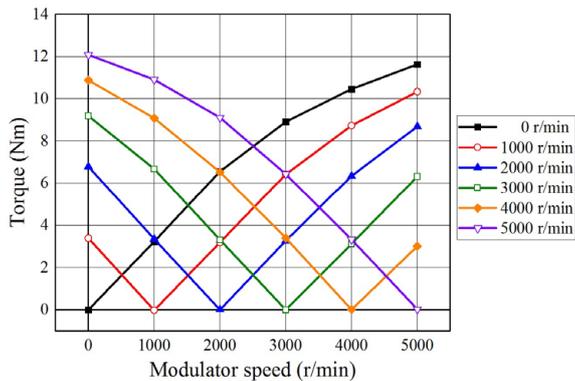


Fig. 7. Modulator speed-torque characteristics with respect to engine speed.

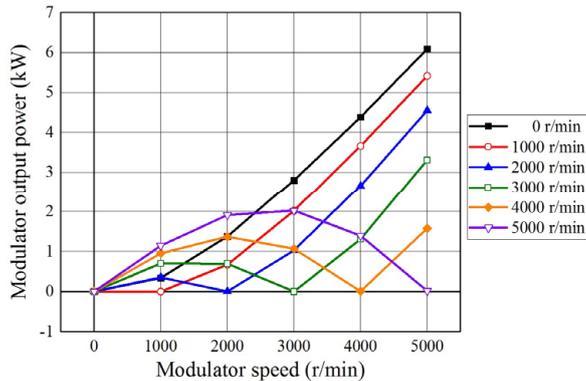


Fig. 8. Modulator speed-modulator output power characteristics with respect to engine speed.

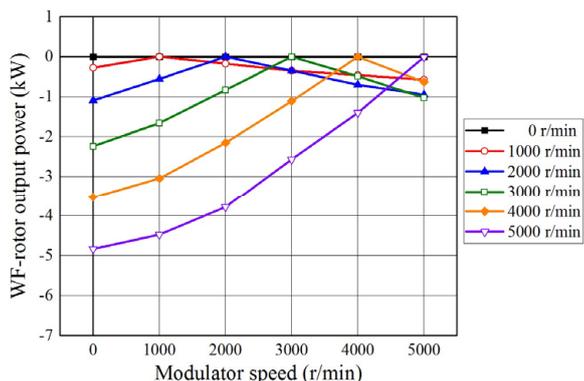


Fig. 9. Modulator speed-WF-rotor output power characteristics with respect to engine speed.

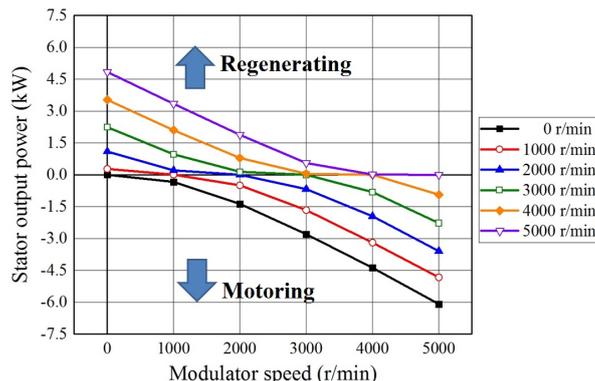


Fig. 10. Modulator speed-stator output power characteristics with respect to engine speed.

の共線図に示すようにエンジン回転速度を 0 r/min から 5000 r/min までの範囲で 1000 r/min ごとに固定にし、ステータ励磁周波数を変更させたときの変調子回転速度-変調子トルク特性を図 7 に示す。最大負荷且つ、ロータ突極の d 軸を位相基準として電磁石トルクが最大となる電流位相の条件でステータ励磁周波数を CW 方向から CCW 方向まで変化させ、変調子を力行駆動したときの結果である。なお、JMAG-Designer (ver. 14) を用いて電磁界解析にてシミュレーションした結果である。同図より、共線図の関係からステータ回転磁界とロータ回転速度の同期する周波数がエンジン回転速度によって異なる。同期回転時は WF ロータに速度起電力が発生しないため、界磁極を自励することができず電磁石トルクが最大となる電流位相で駆動する場合はトルクがゼロとなる。次に図 7 の HEV モード走行時の電力フローについて変調子、WF ロータ、ステータの 3 要素に分解して確認する。図 8 から図 10 に変調子回転速度に対する

変調子出力、WF ロータ出力、ステータ出力特性を示す。図 8 より、常に変調子回転速度は正の電力となっており、力行駆動(タイヤへ駆動力伝達)していることを確認できる。図 9 より、エンジンに直結された WF ロータが常に負の電力となっており、エンジンの動力(機械的パワー)を変調子に伝達できていることを確認できる。図 10 より、変調子出力に対して、WF ロータの出力が余剰であれば回生となり、巻線界磁ロータの出力が不足している状態であれば力行となっていることが確認できる。

〈3-2〉最大トルク制御時の駆動特性 前節の結果をもとに巻線界磁ロータの回転速度(エンジン回転速度)を制御して最大トルク駆動をしたときの特性について検討する。ステータ側の可変周波数範囲は、インバータのキャリア周波数を 12 kHz と想定すると、周波数帯域の都合上、600 Hz を上限としなければならない。エンジンの回転速度範囲は前述のとおり、0 r/min から 5000 r/min である。この 2 つ

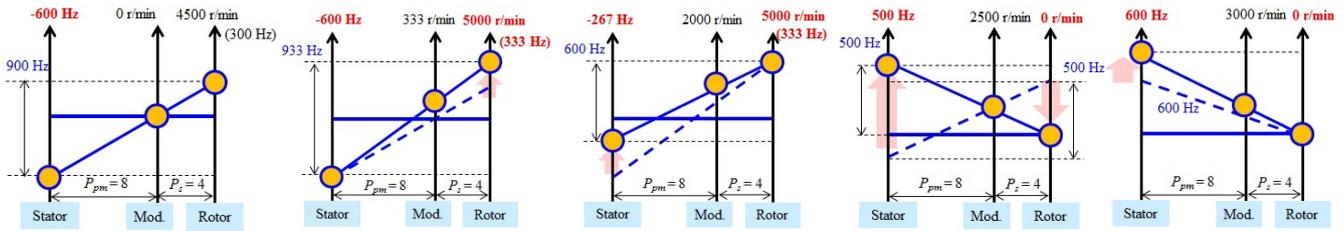


Fig. 11. HEV Drive mode with respect to stator excitation frequency and engine speed.

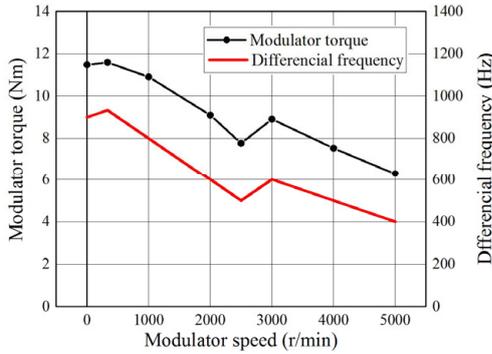


Fig. 12. Maximum modulator torque control characteristics.

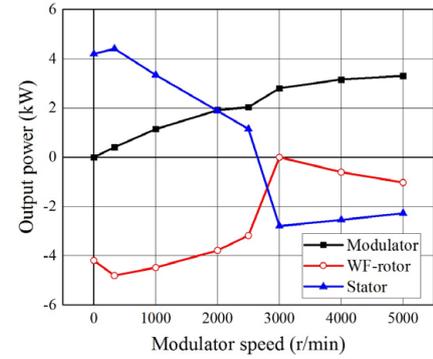


Fig. 13. Output power characteristics under maximum torque control.

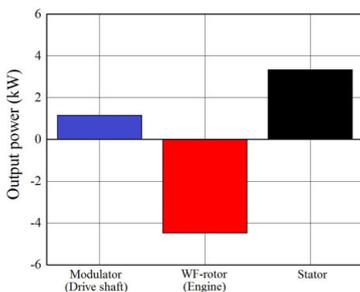


Fig. 14. Modulator speed : 1000 r/min.

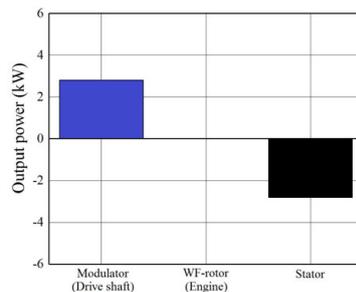


Fig. 15. Modulator speed : 3000 r/min.

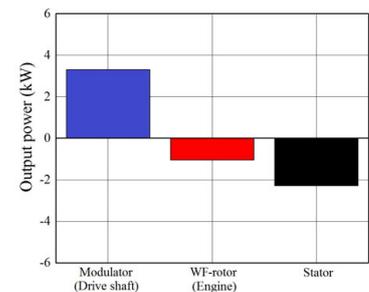


Fig. 16. Modulator speed : 5000 r/min.

の共線図の可変周波数範囲の制約の中で図 11 に示すように HEV モードを変更して、各変調子回転速度に対してなるべく差分周波数が大きくなるように制御する組み合わせを検討した。図 12 に差分周波数を制御して変調子トルクが最大トルクとなるように運転したときの特性を示す。同図に示すように差分周波数を変調子回転速度に対して変更することでトルク特性を向上させることができる。図 13 に図 12 のときの電力フローについて変調子、WF ロータ、ステータの 3 要素に分解して確認した結果を示す。図 14 から図 16 はエネルギーフローを視覚的にわかりやすくするために図 13 を棒グラフにした結果である。図 13 から図 16 より、差分周波数が大きくなる変調子回転速度が低回転領域においては、変調子回転速度が低いため、WF ロータの出力（エンジン出力）は余剰となり、その電力はステータで再生される。一方、変調子回転速度が高回転領域では、エンジン出力とステータ出力が変調子出力となることがわかる。今回の検討では電磁石トルクが最大となる電流位相に固定して検討したが、図 3 に示すように突極構造とすることで WF ロータの同期回転磁界（8 次の回転磁界）と突極パーミアンス分布が同期して、リラクタンストルクの活用もできる。

今後、電流位相も考慮した MTPA 制御特性も検討していく。

4. まとめ

本稿では、磁石フリー磁気ギアモータの HEV モード走行時の可変速特性について検討した。電磁界解析の結果から、巻線界磁ロータの回転速度を制御して界磁エネルギー源となる差分周波数を調整することで出力トルク特性を改善できることを明らかにした。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) K. Kato, M. Morimoto: "Power Distribution of Hybrid Electric Vehicles", *IEEEJ Trans. IA*, Vol. 131-D, No. 5, pp.766-767 (2011)
- (2) M. Fukuoka, K. Nakamura, H. Kato and O. Ichinokura: "A Consideration of the Optimum Configuration of Flux-Modulated Type Dual-Axis Motor", *IEEEJ Technical Meeting*, RM-13-141 (2013)
- (3) M. Aoyama, Y. Kubota and T. Noguchi: "Proposal of Rare-Earth-Free Brushless Wound-Field Magnetic Geared Motor for HEV Application", *IEEEJ Annual Meeting*, No. 5-037, pp.68-69 (2015)
- (4) M. Aoyama, Y. Kubota, T. Noguchi, Y. Motohashi: "Prototype Design of Permanent-Magnet-Free Magnetic Geared Motor for HEV Application", *IEEEJ JIASC*, in press (2015)