

磁石フリー磁気変調形二軸モータの自励動作の実機検証

青山 真大* (スズキ), 野口 季彦, 本橋 勇人 (静岡大学)

Experimental Verification of Self-Excitation of PM-Free Magnetic-Modulated Dual-Axis Motor

Masahiro Aoyama* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi, Yuto Motohashi (Shizuoka University)

This paper describes a PM-free magnetic-modulated dual-axis motor in which a differential frequency between the armature fundamental rotating magnetic field and the rotor rotating frequency is effectively utilized for the field magnetization instead of the permanent magnets. A downsized prototype of proposed PM-free magnetic-modulated motor and the benchmark PM-rotor type magnetic-modulated motor are performed for the purpose of principle verification and clarification of drive characteristics. The current phase-vs.-torque characteristics with respect to the locked modulator spatial position are experimentally revealed through the PM-rotor type magnetic-modulated motor. In addition, the self-excitation of proposed PM-free magnetic-modulated motor is experimentally confirmed by the rotor current measurement via a slip-ring.

キーワード：磁気変調，磁気ギアモータ，自己励磁，差分周波数，ダイオード整流回路

Keywords : magnetic modulation, magnetic-gear motor, self-excitation, differential frequency, diode rectifying circuit

1. はじめに

今日、低炭素化社会に向けて輸送機器分野ではハイブリッド技術を各種エコカー開発に不可欠なコア技術と位置づけ、その普及に取り組んでいる。近年では、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 に示すような磁気変調形モータを用いたシステムが提案されている^{(1)~(3)}。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与える影響が大きい。一方でモータ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。それらの二律背反の要求に対して、二軸出力の磁気変調形モータを採用することで図 2 に示すように従来の遊星ギアとモータを組み合わせたシステムと等価な HEV システムを構築できる⁽¹⁾。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動作するため、永久磁石 (PM) に対する外部磁場の変動が大きくなり、高保磁力磁石を用いるとともに磁石渦電流損の対策が必要になる。それらの課題に鑑み、筆者らは損失増加の主要因となっていた磁気変調形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変調形モータを提案した⁽⁴⁾。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⁽⁵⁾。本稿では実機検証によりベンチマ

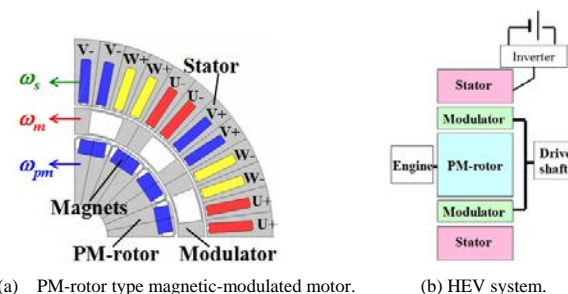


Fig. 1. Cross section of PM-rotor type magnetic-modulated dual-axis motor and HEV system application.

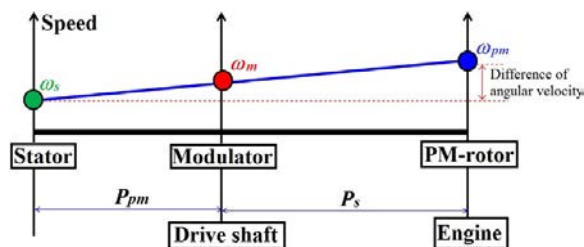


Fig. 2. Collinear chart of magnetic-modulated motor for HEV system.

ークの従来形磁気変調形モータ (PM ロータタイプ) を用いて変調子位置に対する電流位相-トルク特性を明らかにしたのち、提案モータの巻線界磁ロータ (WF ロータ) のロータ電流を実測して自励動作の確認を行ったので報告する。

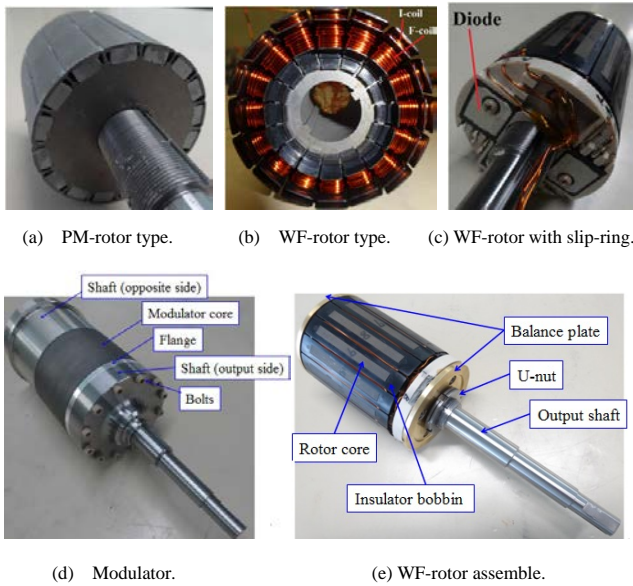


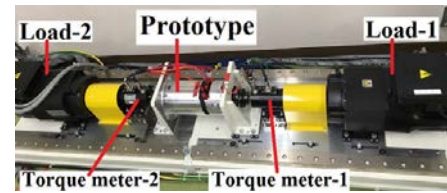
Fig. 3. Prototype machine.

Table I. Specifications of downsized prototype machine.

Number of stator poles ($2P_s$)	8
Number of rotor poles ($2P_{pm}$)	16
Number of modulator poles (P_m)	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} (45 s)
Armature winding resistance	15.1 mΩ / 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 mΩ / pole
F-coil resistance	47 mΩ / pole
Thickness of iron core steel plate	0.3 mm (30DH)

2. 原理検証機と実機評価環境

図3にベンチマーク (PM ロータタイプ) と提案モータ (WF ロータタイプ) の原理検証機を示す。モータの主要諸元は表1に示すとおりである。第4章で述べる提案モータ (WF ロータタイプ) のロータ電流測定は図3(c)に示すようにロータ上の4つのダイオード整流回路のうち1つをスリップリングを介し外部で整流回路を構成し測定している。ベンチマークのPMロータに用いている磁石は信越化学工業製N39UH ($B_r = 1.22$ T, $H_{cb} = 965.7$ kA/m @293 K) であり、提案モータのWFロータに用いるカソードコモンSiCダイオードはローム製 (SCS230AE2, $V_R = 650$ V, $I_F = 15$ A/leg)



(a) Experimental setup.



(b) Locked modulator with jig. (c) Angle measuring instrument.

Fig. 4. Outlook of experimental setup.

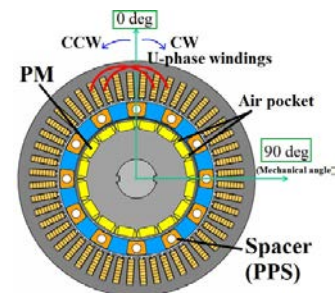


Fig. 5. Phase reference of modulator lock angle.

である。実機評価環境は図4に示すように2つの負荷 (Load-1, 2) をそれぞれ独立して速度制御し、ミネベア製トルク計 (Torque meter-1, 2) でトルク測定を行う。図示していないが、電力はHIOKI製電力計 (PW6001) を用いており、試作機はMywayプラス製汎用インバータを用いてトルク制御している。

3. 変調子位置に対する電流位相-トルク特性

磁気変調形モータの基本的な駆動特性を明らかにするため、まずはベンチマーク (PM ロータ) を用いて電流位相-トルク特性を測定した。今回は図3(d)の変調子出力軸を図4(b)に示すように治具を用いてロックし、PMロータを150 r/min (電気角周波数20 Hz) の駆動条件下にてロックされた変調子位置に対する電流位相-トルク特性を測定した。変調子ロックの位置は図4(c)に示す角度計 (ベベルボックス) を用いて測定した。図5に示す変調子の位置基準位置にて、電機子起磁力別の変調子ロック位置に対する電流位相-トルク特性の実測結果を図6示す。CW方向に機械角で90 deg (変調子の極数換算した電気角で1080 deg, 電機子の極数換算した電気角で360 deg) まで機械角で1 deg刻みでロックする位置を変化させて測定した。電流位相基準は変調子ロック位置が0 degでU相電機子巻線に対してd軸 (磁石磁極位置) が対向するようにしている。図6より、変調子位置に対して最大トルクと最小トルクは変化せず、電流位相-トルク特性のMTPA点の位相のみがシフトしていくことがわかる。同図において変調子位置は電機子の極数で換算し

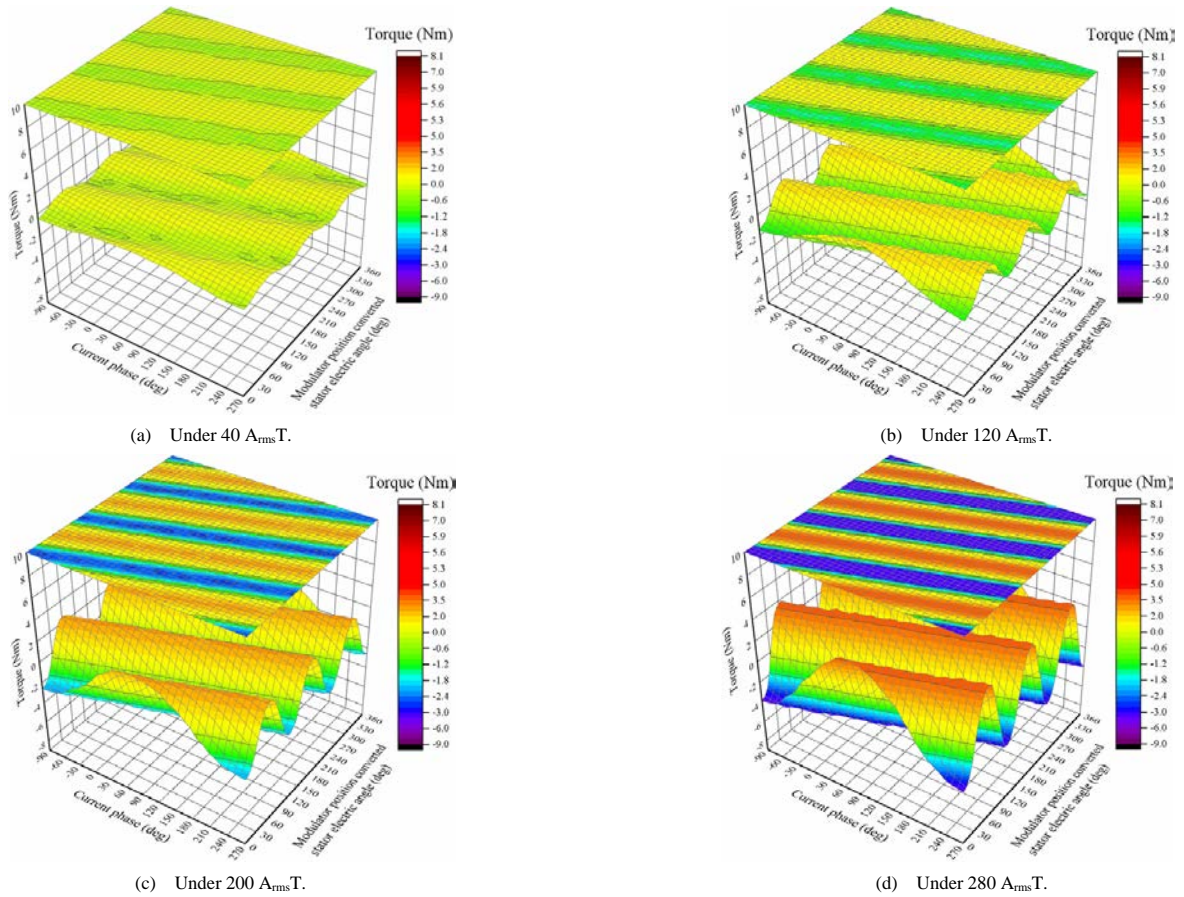


Fig. 6. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to modulator position (measured).

ているが、変調子の極数換算で 1080 deg のため、電機子の電気角 1 周期中に変調子の鉄心が 3 つ含まれる。よって、電機子の極数で換算した変調子位置が 0~360 deg 変化したときに 3 周期の脈動で電流位相-トルク特性の MTPA 点の位相がシフトしていることが確認できる。さらに電機子起磁力が増加するに従い、変調子のパーミアンス分布の影響が大きくなるため変調子位置に対する電流位相-トルク特性の変化が顕著になる。また、図 3(a)に示すように磁石ロータは q 軸に溝を設けて第 5 次、第 7 次高調波を低減する設計をしているため、突極比が低く SPM に近い IPM 構造となっている。そのため、図 6 で確認できるようにマグネットトルクが支配的な電流位相-トルク特性となっている。

4. 自励動作の実機検証

前章で変調子の位置に対して最大トルクと最小トルクは変化せず、電流位相-トルク特性の MTPA 点の位相のみがシフトしていくことを明らかにした。本章では変調子の位置を 0 deg で固定し、電機子起磁力が 360 ArmsT、480 ArmsT のときに提案モータ (WF ロータタイプ) のロータ巻線に流れるロータ電流を測定することにより、自励動作の実機検証を行う。図 7 に示す共線関係が成立する駆動条件下 (WF ロータを CCW 方向に 650 r/min) で駆動し、ロータ電流は図 8 に示すスリップリングを介してロータ巻線整流回路の 1 組をダイオード結線し、クランプ形電流センサを用いて測定

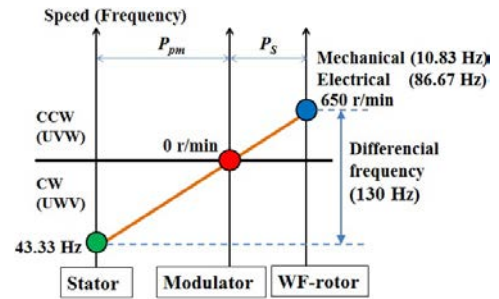


Fig. 7. Collinear chart of experimental condition.

した。図 9 にロータ電流と U 相電機子電流の測定結果を示す。同図から自励により差分周波数 (130 Hz) のロータ電流が流れていることが確認できる。ここで電機子起磁力 $F_s(\omega_s t)$ を(1)、変調子パーミアンス $P(\theta, \omega_m t)$ を(2)で表し、 θ を変調子の空間的な位相と定義すると磁気変調後のギャップ磁束 $\phi_g(\theta, \omega_s t, \omega_m t)$ は(3)で表される。

$$F_s(\omega_s t) = f_{ac} \cos(P_s \omega_s t - \delta) \tag{1}$$

$$P(\theta, \omega_m t) = \{\lambda_{dc} + \lambda_{ac} \cos(3\theta - \gamma)\} \cos P_m \omega_m t \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \phi_g(\theta, \omega_s t, \omega_m t) &= F_s(\omega_s t) P(\theta, \omega_m t) \\ &= f_{ac} \lambda_{dc} \cos(P_s \omega_s t - \delta) \cos P_m \omega_m t \\ &+ \frac{1}{2} f_{ac} \lambda_{ac} \left\{ \begin{aligned} &\cos((P_s \omega_s + P_m \omega_m) t - \delta) \\ &+ \cos((P_s \omega_s - P_m \omega_m) t - \delta) \end{aligned} \right\} \cos(3\theta - \gamma) \end{aligned} \tag{3}$$

提案する磁気変調形モータは(4)の共線関係を満たすことでインナーロータ (PM ロータまたは WF ロータ) が高調波同期駆動する⁽⁶⁾。

$$P_{pm}\omega_{pm} = -(P_s\omega_s - P_m\omega_m) \quad (4)$$

ここで P_{pm} はインナーロータの極対数, ω_{pm} は機械角速度である。今回, 変調子ロック (0 r/min) で実機検証しているため, $\omega_m t = 0$ とおくと磁気変調後のギャップ磁束は(5)となる。

$$\begin{aligned} \phi_g(\theta, \omega_s t, 0) = & f_{ac}\lambda_{dc} \cos(P_s\omega_s t - \delta) \\ & + f_{ac}\lambda_{ac} \cos(P_s\omega_s t - \delta) \cos(3\theta - \gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

このとき(4)より, $P_{pm}\omega_{pm} = -P_s\omega_s$ が成立するように電機子基本波回転磁界の方向に対してインナーロータの回転方向を逆方向にすることで図 7 の共線関係で駆動することができる。一方, (5)より変調子のパーミアンス分布 3θ が電機子基本波回転磁界に重畳してギャップ磁束として発生することがわかる。提案モータのロータ巻線は図 10 に示すように整流回路結線されているため変調子のパーミアンス分布 3θ と WF ロータの突極の空間的な位置関係から誘導電流の順方向と逆方向は同じ波形になるべきである⁽⁶⁾。しかし, 図 9 より逆方向の誘導電流振幅が低い結果となった。電機子起磁力が変化しても同様の結果であることから 3θ 以外の高調波パーミアンス成分が逆相で重畳したことによる影響であると考えられる。詳細な分析は今後の課題とする。

5. まとめ

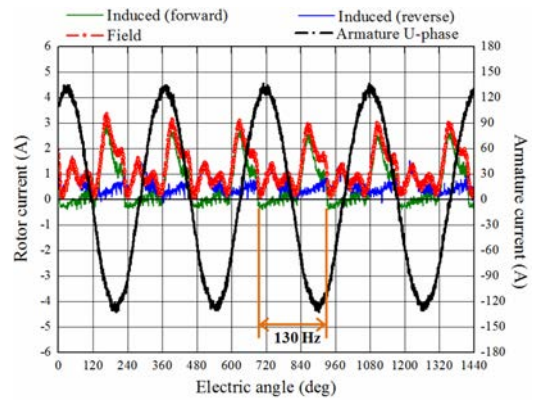
本稿では, 磁石ロータタイプの磁気変調形モータにて変調子をロックさせた場合の変調子位置に対する電流位相-トルク特性を実験的に明らかにした。さらに提案する磁石フリー磁気変調形モータのロータ電流測定を行い, ステータ側の回転磁界とロータの回転周波数の差分周波数で自励できることを実機検証により確認した。今後は変調子も駆動させ, 共線図上の様々な駆動点における電流位相-トルク特性や効率マップ, ロータ電流の測定を進める予定である。

文 献

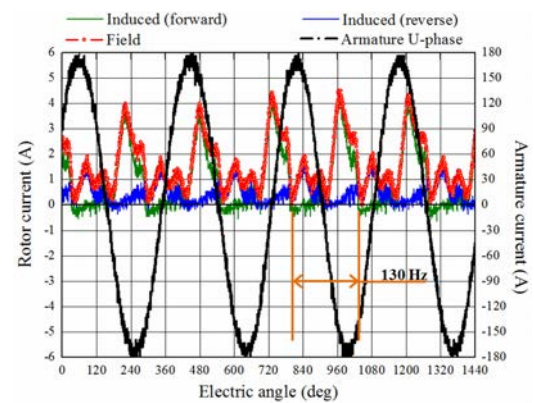
- (1) M. Fukuoka, K. Nakamura, H. Kato and O. Ichinokura: "A Consideration of the Optimum Configuration of Flux-Modulated Type Dual-Axis Motor", *IEEJ Technical Meeting*, RM-13-141 (2013)
- (2) L. Jian, and K. T. Chau: "Design and Analysis of Integrated Halbach-Magnetic-Gear Permanent-Magnet Motor for Electric Vehicles", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol.7, pp.1213-1219 (2009)
- (3) K. Atallah, S. Calverley, and D. Howe: "Design, Analysis and Realization of a High-Performance Magnetic Gear", *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol.151, No. 2, pp.135-143 (2004)
- (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, and T. Noguchi: "Experimental Verification of Radial-Air-Gap-Type Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles", *IEEJ Trans. I.A.*, Vol. 135, No. 8, pp.869-881 (2015)



Fig. 8. Slip-ring for rotor current measurement.

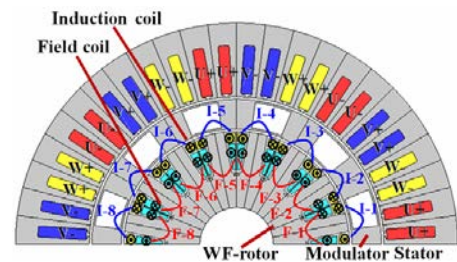


(a) Under 360 A_{ms}T.

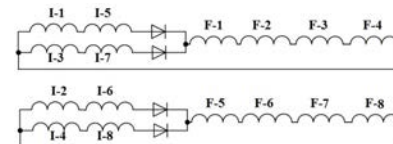


(b) Under 480 A_{ms}T.

Fig. 9. Rotor currents and armature U-phase current (measured).



(a) Cross section of proposed magnetic-modulated dual-axis motor.



(b) Rotor winding rectifier circuits.

Fig. 10. Proposed magnetic-modulated dual-axis motor.

- (6) M. Aoyama, Y. Kubota, and T. Noguchi: "Study on Rotor Rectifier Circuit of Permanent-Magnet-Free Magnetic Geared Motor for HEV Application", *IEEJ Technical Meeting*, MD-15-076, RM-15-057, VT-15-004 (2015)