

空間高調波を界磁エネルギー源とする レアアースフリーモータの可変速特性

青山 真大* (静岡大学, スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Adjustable Speed Drive Characteristics on Rare-Earth Free Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics

Masahiro Aoyama* (Shizuoka University, Suzuki Motor Corporation),
Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a synchronous motor in which space harmonics power is utilized for field magnetization instead of permanent magnets. The stator has a concentrated winding structure, and the rotor has two sorts of windings, i.e., an induction pole winding that retrieves mainly the third space harmonics and an E-coil pole winding for field magnetization. Both of the coils are connected via diode rectifying circuits. The current phase to torque characteristics and the adjustable speed drive characteristics of the proposed motor were studied by means of FEM based magnetic field analysis.

キーワード：同期モータ, 自己励磁, 巻線界磁, 誘導電流, 界磁電流, 電磁石

(Keyword, synchronous motor, self-excitation, wound-field, induction current, field current, electromagnet)

1. はじめに

パワートレインのエネルギー効率, CO₂ 排出量の削減および燃費向上への要求は, 輸送機器メーカーにとって重要な課題の一つである。パワートレインのエネルギー効率向上のアプローチとして, 電気自動車 (EV), ハイブリッド自動車 (HEV) などがある。それらのシステムに組み込まれるモータや発電機はシステム効率向上のため, 広い可変速特性と小形, 高効率を兼ね備えた回転機であることが望まれ, 専ら埋め込み永久磁石同期モータ (IPMSM) が用いられている。それらに用いられる磁石は, 小形化, 高エネルギー密度化の要求から残留磁束密度が高く, 耐熱性を確保できる Dy や Tb を添加した高価なネオジウム磁石が一般的である^①。加えて Dy や Tb といった重希土類は産出地が偏在しており枯渇の懸念があるだけでなく, 今後の HEV, EV の普及によって PMSM の生産台数が増加すると資源供給の不安定性が益々顕在化すると考えられる。そのようなコストと資源供給面の懸念に対して, 近年さまざまなレアアースフリーモータや磁石を電磁石に置き換えた巻線界磁形モータの提案がされている。レアアースフリーモータとしては, 板厚 0.1 mm の電磁鋼板を用いたスイッチトリラクタンスモータ (SRM) などが発表されているが, PMSM とは異なり,

二次側に界磁源を有していないため, 一次側から界磁エネルギーを供給する必要があるため, 車載用で特に効率が重視される低負荷領域の効率低下を免れない^②。さらに 0.1 mm の電磁鋼板はコスト的に不利である上, 金型で打ち抜く生産面でも問題がある。一方, 巻線界磁形モータとしては, フラックススイッチングモータなどが発表されているが, 他励式界磁のため, 一次側から DC 電流を供給する DC-DC コンバータが必要になることや, 界磁巻線での銅損により一次側から供給する界磁エネルギーを全て二次側に供給できないという問題を有している^③。筆者らは上記のような問題に鑑み, 従来損失となっていた空間高調波を界磁エネルギー源として自励式電磁石に活用するレアアースフリーモータを既に提案した^④。本稿では, 電磁界解析にて負荷率に対する電流位相-トルク特性と駆動周波数に対するトルク特性を明らかにしたので報告する。

2. モータ諸元

図 1 と表 1 に空間高調波を界磁エネルギー源とする提案モータの諸元と径方向断面図を示す。提案モータは, 空間高調波から有効な界磁エネルギーを生じさせることができるようにエネルギー回収用の補極 (誘導極, 以下, I-pole) と空間高調波が I-pole に鎖交することで誘導された誘導電

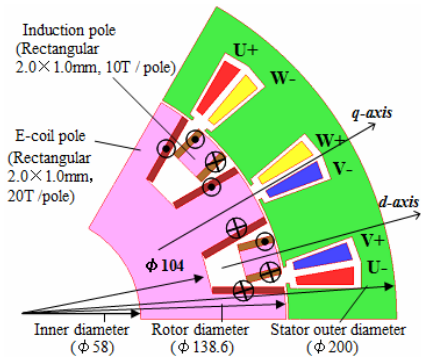


図 1 提案モータの断面図

Fig. 1. Cross section diagram of proposed motor.

表 1 モータ諸元

Table 1. Specifications of proposed motor.

Number of poles	12
Number of slots	18
Stator outer diameter	200 mm
Rotor diameter	138.6 mm
Axial length of core	54 mm
Air gap length	0.7 mm
Maximum current	273 A _{pk}
Stator winding resistance	32.1 mΩ / phase
Number of coil-turn	48
Winding connection	6 parallel
I-pole winding resistance	72.4 mΩ
E-pole winding resistance	161.3 mΩ
Thickness of core steel plate	0.35 mm

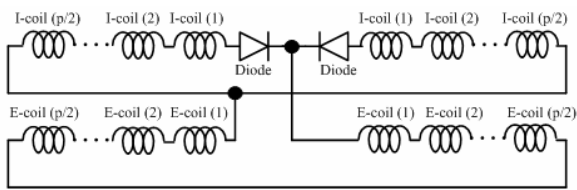


図 2 ロータ巻線結線図

Fig. 2. Rotor winding connection diagram.

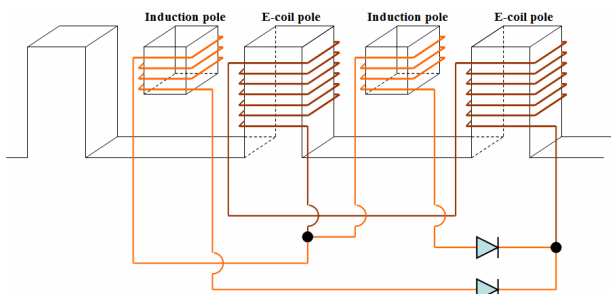


図 3 ロータ巻線の斜視図

Fig. 3. Perspective configuration of rotor windings.

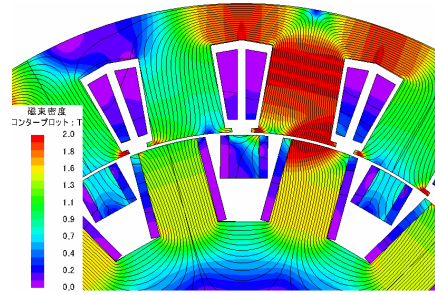


図 4 磁束密度分布および磁束線

Fig. 4. Magnetic flux density distribution and flux lines.

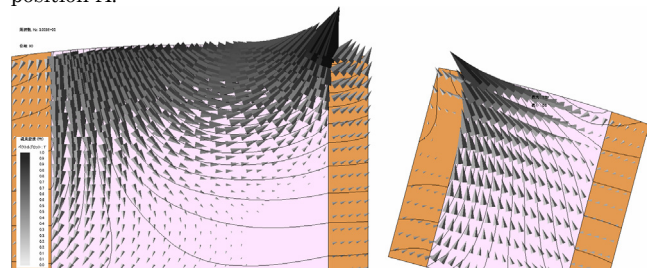
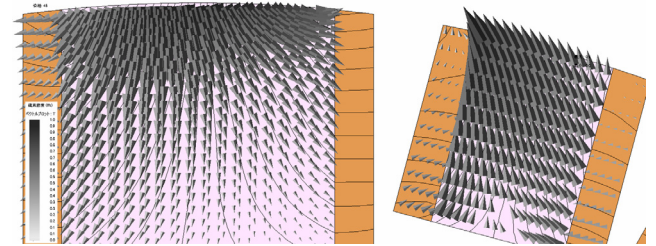
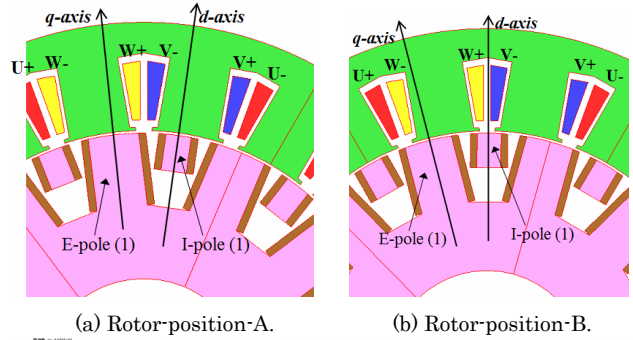


図 5 ロータ位置における第 3 次空間高調波分布

Fig. 5. Magnetic flux vector of 3rd space harmonics at rotor-position.

流が整流されて電磁石を形成する励磁極 (E-coil 極, 以下, E-pole) の 2 つの極を有している。図 2 に提案モータのロータ巻線結線図を示し、図 3 にロータ巻線結線の斜視図を示す。図 2 の括弧内は各極の番号を表しており、p は極数を意味している。図 2 に示すようにロータ巻線は全波整流回路となっており、I-pole に誘導された誘導電流からより多くの界磁電流を得ることができるように結線されている。また、ダイオードの素子数を低減するため全直列結線されて

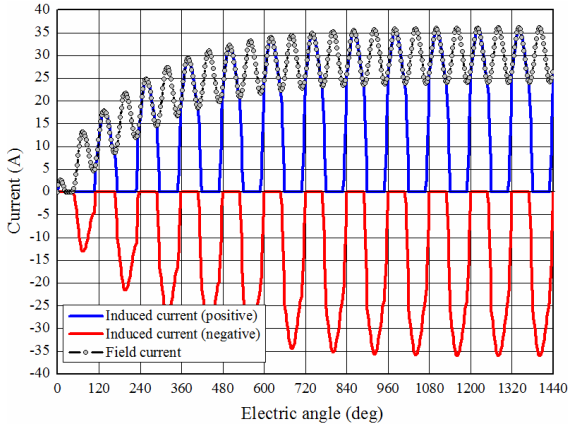


図 6 誘導電流と界磁電流特性

Fig. 6. Induced current and field current characteristics.

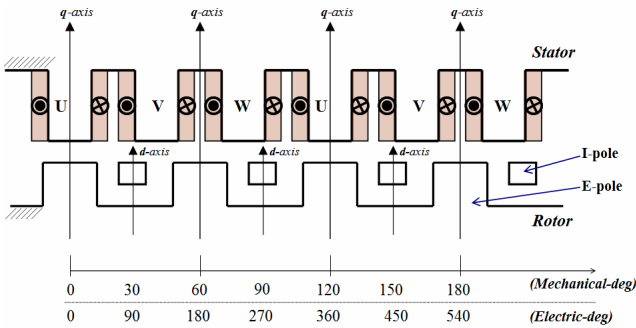


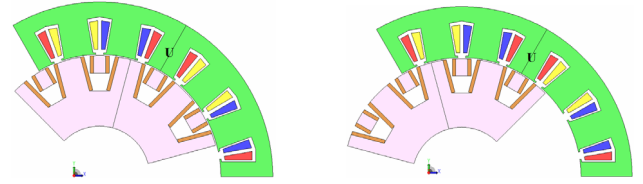
図 7 モータ突極モデル

Fig. 7. Salient pole model of proposed motor.

いる。なお、突極比が下がることでトルクが低下することを防止するため、I-pole と E-pole は磁的に遮蔽しており、図 4 に示すようにトルク発生に寄与する周方向電磁力はロータ突極部でのみ発生し、I-pole はトルク発生に寄与しない。I-pole は端板等でアキシャル方向から保持する機構を想定している。

3. 自己励磁

〈3・1〉 空間高調波分布 提案モータは、第 3 次空間高調波を主な界磁エネルギー源として自己励磁により電磁石を E-pole で形成する。図 5 にそれぞれのロータとステータの位置関係のときの第 3 次空間高調波磁束ベクトルと磁束線図を示す。同図(a)および(b)のロータ位置における I-Pole (1)と E-pole (1)に分布する第 3 次空間高調波分布を同図(c)および(d)に示している。両図に示すようにロータとステータの位置関係によってインダクタンス (磁気抵抗) が異なるため、空間高調波分布が異なるがどの位置関係においても第 3 次空間高調波磁束ベクトルが I-pole に鎖交していることが確認できる。図 6 に空間高調波が I-pole に鎖交することで誘導された誘導電流と全波整流されて電磁石を形成する界磁電流特性を示す。なお、時間高調波を考慮せず正弦波電流源にて 1000 r/min, 最大負荷 (273 A_{pk}) 且つ、電流位相 $\beta=60 \text{ deg}$ のときの解析結果を示している。同

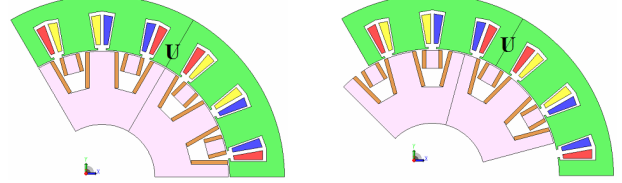


(a) 90 deg (electric).

(b) 270 deg (electric).

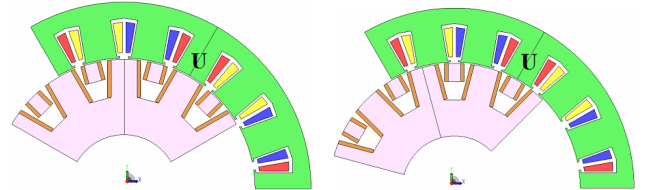
図 8 相互インダクタンスのロータ位置依存性

Fig. 8. Rotor position dependency of mutual inductance.



(a) 0 deg (electric).

(b) 90 deg (electric).



(c) 180 deg (electric).

(d) 270 deg (electric).

図 9 ステータの自己インダクタンスのロータ位置依存性

Fig. 9. Rotor position dependency of stator self-inductance.

図より、空間高調波を界磁エネルギー源として自己励磁式の電磁石を形成できることが推察される。

〈3・2〉 自己励磁の数学モデル 前項で第 3 次空間高調波が I-pole に鎖交していることを電磁界解析により確認したが、ここでは I-pole に誘起される電圧に第 3 次空間高調波が含まれることを数学的に考察する。

U 相基準で考えたときに I-pole に誘起される起電力 $E_I(\theta, t)$ は、ステータの電機子電流 $I_s(t) = I_s \sin(\omega t + \delta)$ 、I-pole の電流を $I_I(t)$ 、図 7 に示したロータの位置基準に対する変位を電気角 θ とおくと、I-pole の自己インダクタンス $L_I(\theta)$ による誘起電圧 $E_{II}(\theta, t)$ と相互インダクタンス $M_{sI}(\theta)$ による誘起電圧 $E_{sI}(\theta, t)$ の和となるので、(1)で表すことができる。

$$E_I(\theta, t) = E_{II}(\theta, t) + E_{sI}(\theta, t) = \frac{d\{L_I(\theta)I_I(t)\}}{dt} + \frac{d\{M_{sI}(\theta)I_s(t)\}}{dt} \\ = I_I(t) \frac{dL_I(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + L_I(\theta) \frac{dI_I(t)}{dt} + I_s(t) \frac{dM_{sI}(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + M_{sI}(\theta) \frac{dI_s(t)}{dt} \quad (1)$$

相互インダクタンス $M_{sI}(\theta)$ はロータ位置依存性を有しており、図 7 に示す座標基準で考えたとき図 8(a)に示す電気角 90 deg で最大、同図(b)に示す電気角 270 deg で最小となるので下式で表すことができる。

$$M_{sI}(\theta) = M_{sI} \sin \theta \quad (2)$$

よって、(1)は次式のように表すことができる。

$$E_I(\theta, t) = \omega I_I(t) \frac{dL_I(\theta)}{d\theta} + L_I(\theta) \frac{dI_I(t)}{dt} + \omega I_s(t) \frac{d(M_{sI} \sin \theta)}{d\theta} + (M_{sI} \sin \theta) \frac{dI_s(t)}{dt} \quad (3)$$

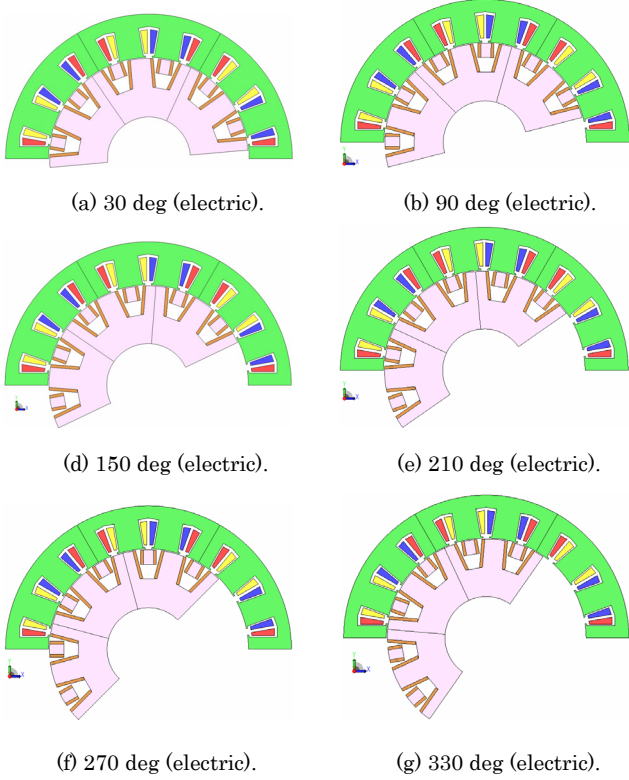


図 10 I-pole の自己インダクタンスのロータ位置依存性

Fig. 10. Rotor position dependency of I-pole self-inductance.

ここで、相互インダクタンス係数 M_{sl} は I-pole コイル (以下、I-coil) に鎖交する磁束を ϕ_l 、ターン数を N_l とおくと、(4) で表すことができる。

$$M_{sl} = \frac{N_l \phi_l}{I_s(t)} \quad (4)$$

近似条件として、ステータ側の電機子磁束 ϕ_s が漏れ分無く I-coil に鎖交しているとする、 $\phi_s = \phi_l$ となる。電機子磁束 ϕ_s は、電機子巻線のターン数を N_s とおくとステータの自己インダクタンス $L_s(\theta)$ を用いて(5)で表すことができる。

$$\phi_l = \phi_s = \frac{I_s(t)L_s(\theta)}{N_s} \quad (5)$$

ステータの自己インダクタンス $L_s(\theta)$ は、突極を有する場合、ロータ位置によって変動し、図 9(a), (c) のときに最大となり、図 9(b), (d) のときに最小となる。よって、自己インダクタンスの一定成分を L_{s0} とおくと、(6) で表すことができる。

$$L_s(\theta) = L_{s0} + L_s \cos 2\theta \quad (6)$$

同様に、ロータの自己インダクタンス $L_l(\theta)$ もロータ位置によって変動する。図 10 に示すロータ位置が電気角で 30 deg, 150 deg, 270 deg のとき最大となり、90 deg, 210 deg, 330 deg のとき最小となる。よって一定成分を L_{l0} とおくと、(7) で表すことができる。

$$L_l(\theta) = L_{l0} + L_l \cos\left(3\theta - \frac{\pi}{6}\right) \quad (7)$$

以上より、(3)に(4), (5), (6), (7)を代入して整理すると(8)のように I-pole に誘起される起電力 $E_l(\theta, t)$ を導出すること

ができる。

$$E_l(\theta, t) = -3\omega L_l I_l(t) \sin\left(3\theta - \frac{\pi}{6}\right) + \left\{ L_l + L_{l0} \cos\left(3\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right\} \frac{dI_l(t)}{dt} + \frac{1}{2} \frac{N_l}{N_s} \omega I_s \left[\begin{array}{l} 2L_{s0} \sin(\omega t + \delta + \theta) \\ + L_s \{ 2 \sin(\omega t + \delta + 3\theta) + \sin(\omega t + \delta - 3\theta) \} \\ - \sin(\omega t + \delta + \theta) \end{array} \right] \quad (8)$$

(8)において、右辺第一項は空間高調波が I-pole に鎖交することで誘導電流が流れて発生する誘起電圧を表しており、角速度 ω の係数から回転速度に対して変動する値であることがわかる。第二項は、I-pole の誘導電流の時間変化に起因して発生する誘起電圧、第三項は相互作用によって誘起される電圧の項を表している。同式の 3θ は空間的位相の 3 倍調波、すなわち第 3 次空間高調波を意味しており、I-pole には第 3 次空間高調波によって誘起される電圧が発生することがわかる。

4. 可変速特性

〈4・1〉 トルク式 自己インダクタンスと相互インダクタンスの磁気エネルギー W は、ステータと E-pole との相互インダクタンスを $M_{se}(\theta)$ とおくと(9)で表すことができる。

$$W = \frac{1}{2} I_s^2(t) L_s(\theta) + \frac{1}{2} I_l^2(t) L_l(\theta) + I_s(t) I_l(t) \{ M_{sl}(\theta) + M_{se}(\theta) \} \quad (9)$$

トルク T は、(9)の磁気エネルギーを θ で偏微分した値となるので、ギャップの不均一、すなわち磁気抵抗 (リラクタンス) の不均一によって生じるトルクと、相互インダクタンスの変化によって生じるトルクとして(10)で表される。

$$T = \frac{1}{2} I_s^2(t) \frac{\partial L_s(\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} I_l^2(t) \frac{\partial L_l(\theta)}{\partial \theta} + I_s(t) I_l(t) \frac{\partial \{ M_{sl}(\theta) + M_{se}(\theta) \}}{\partial \theta} \quad (10)$$

(10)に(2), (6), (7)を代入し、 $M_{sl}(\theta)$ は $M_{sl}(\theta)$ と同様に考えて $M_{le}(\theta) = M_{le} \cos \theta$ と表せられるため、(10)を整理すると(11)で表すことができる。

$$T = -L_s I_s^2(t) \sin 2\theta - \frac{3}{2} L_l I_l^2(t) \sin\left(3\theta - \frac{\pi}{6}\right) + I_s(t) I_l(t) \{ M_{sl} \cos \theta - M_{se} \sin \theta \} \quad (11)$$

(11)において、右辺第一項はリラクタンストルクを表しており、第二項と第三項は自己励磁式の電磁石トルクを表している。すなわち、自励式電磁石トルク項について第 3 次空間高調波が界磁エネルギー源となっていることがわかる。

〈4・2〉 電流位相—トルク特性 電流位相に対する自励式電磁石トルクと総合トルクの特性を明らかにするため、電機子電流を変えながら電磁界解析を行った。図 11 に 1000 r/min 固定で電機子電流を 100 A_{pk}, 200 A_{pk}, 最大電

流 273 A_{pk} としたときの電流位相-トルク特性を示す。なお、電流位相基準は q 軸である。また、リラクタンストルクと電磁石トルクの分離は、電流位相を変化させたときの総合トルク特性の解析結果と、ロータを鉄心のみとして電流位相 45 deg で求めたトルクを振幅とする $\sin 2\beta$ 関数 (β は電流位相) のリラクタンストルクとの差分から導出している。さらに、自己励磁による界磁が確立するまでの過渡期間があるため、定常状態になった後の電気角周期に対する平均トルクをプロットしている。同図より、自励式電磁石トルクは電機子電流の増加とともに増加していき、電流位相が 0 deg 及び 180 deg 近傍で最小、90 deg 近傍で最大となり、 $\sin(\beta+\pi/2)$ 関数のような特性を有していることがわかる。電流位相が 0 deg から 60 deg 間において電機子電流が増加するに従い自励式電磁石トルクは歪んだ特性を示し、例えば電流位相 90 deg が最大振幅の $\sin(\beta+\pi/2)$ 関数と仮定した場合に対称となるべき電流位相 120 deg から 180 deg 間の特性とは異なっている。これは dq 軸間のインダクタンスの磁気干渉、もしくは負荷率による I-pole に鎖交する空間高調波分布の差に起因すると考えられるが詳細は今後の検討課題である。

図 12 に 1000 r/min 固定で電機子電流を 100 A_{pk}, 200 A_{pk}, 最大電流 273 A_{pk} として、MTPA 制御を行った場合の正側誘導電流特性を示す。図 13 に同様に界磁電流特性を示す。図 12 より電機子電流の増加とともに I-pole に流れる誘導電流が増加することが確認できる。すなわち、(11) に示すように自励式電磁石トルクが電機子電流 $I_s(t)$ の関数であることと一致する。また、図 13 から電機子電流の増加とともに界磁電流が増加していくことも確認でき、図 12 との関係から空間高調波に対して界磁エネルギーが変化していることがわかる。同図にて界磁電流のリプルも電機子電流の増加とともに増加しているが、第 3 次空間高調波の I-pole 鎖交量が増加することで誘導電流の 3 倍調波が増加し、全波整流時の正負切り換えタイミングでリプルが増加したことに起因していると考えられる。

〈4・3〉 自励式電磁石トルクの周波数特性 I-pole に誘起される電圧が(8)で表されるように、回転速度に対して空間高調波により誘起される電圧の振幅は変動する。したがって、回転速度に対して界磁電流が増減することで自励式電磁石トルクも周波数依存性を有する。これは、ファラデーの法則に従い、I-pole に鎖交する磁束 (空間高調波磁束) の時間変化が変動することにより、誘起される電圧も変動することによる。そこで、前節と同様の手法で電流位相に対する自励式電磁石トルクと総合トルクの特性を回転速度別に明らかにした。図 14 に電機子電流を 273 A_{pk} 固定で回転速度を 500 r/min, 1000 r/min, 2000 r/min, 3000 r/min としたときの電流位相-トルク特性を示す。同図より、電圧制限楕円内の定トルク領域で且つ、鉄損を考慮しなければリラクタンストルクは回転速度に対して不変であるが自励式電磁石トルクは、周波数の関数となるため回転速度の増加とともに増加していくことがわかる。よって、回転速

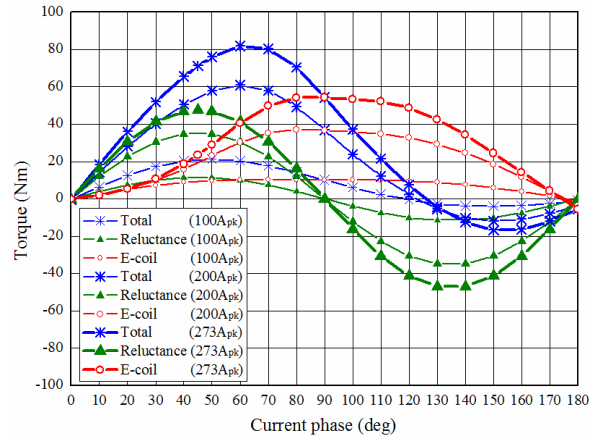


図 11 電機子電流に対する電流位相-トルク特性 (1000 r/min)
Fig. 11. Current phase-torque characteristics with respect to armature current at 1000 r/min.

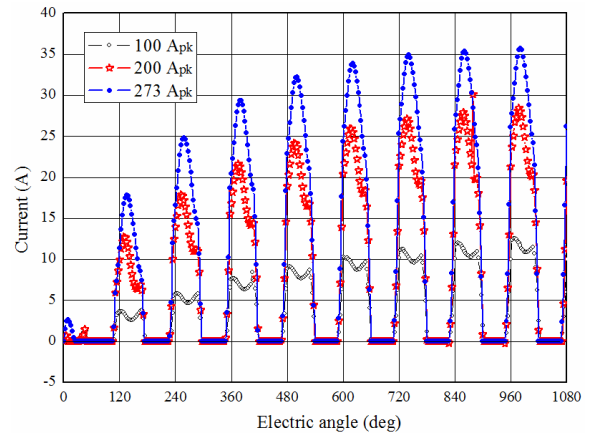


図 12 電機子電流に対する正側誘導電流特性 (1000 r/min)
Fig. 12. Induced current (positive) characteristics with respect to armature current at 1000 r/min under MTPA control.

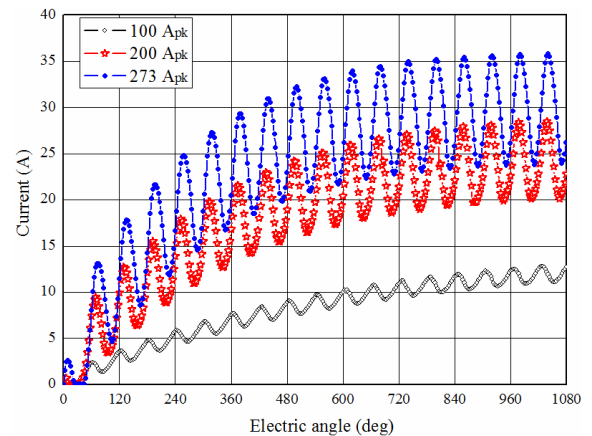


図 13 電機子電流に対する界磁電流特性 (1000 r/min)
Fig. 13. Field current characteristics with respect to armature current at 1000 r/min under MTPA control.

度が高くなるに従い、総合トルクに占める自励式電磁石トルクの割合が増加していくため、MTPA 制御時の最適電流位相は進角していく傾向となることがわかる。図 15 に電機子電流を 273 A_{pk} 固定としたときの回転速度に対する正側

誘導電流特性を示し、図 16 に同様に界磁電流特性を示す。両図より、回転速度の増加とともに I-pole に鎖交する空間高調波によって誘導される誘導電流が増加し、全波整流により形成される界磁電流も増加するがわかる。なお、回転速度の増加とともにインダクタンスが増加するためロータが磁化するまでの過渡状態が長くなることも両図の電流勾配からわかる。

一方、回転速度の増加とともに自励式電磁石トルクが増加するため総合トルクも増加するが、電磁石コイルが巻かれているロータ突極部鉄心の磁気飽和によって制約される。

5. まとめ

本稿では、空間高調波を界磁エネルギー源とするモータを提案し、その主な界磁源が第 3 次空間高調波であることを数理的に説明した。さらに、リラクタンストルクと自励式電磁石トルクの電流位相に対する特性を電磁界解析により明らかにした。検討結果から、自励式電磁石トルクは近似的に $\sin(\beta+\pi/2)$ 関数の特性を有することがわかった。また、自励式電磁石トルクはファラデーの法則に基づき回転速度の増減とともに増減することを電磁界解析により明らかにした。加えて、回転速度の増加とともに自励式電磁石トルクが増加していくため、MTPA 制御時の最適電流位相 β が進角していくこともわかった。

今後は、提案モータの数学モデルについて検討を進めるとともに、低速領域において同一体積で IPM モータに比肩するトルクを出力できるよう詳細な磁気回路設計を行っていく。

文 献

- (1) Yoshinori Sato, Shigeaki Ishikawa, Takahito Okubo, Makoto Abe and Katsunori Tamai : "Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle", SAE Technical Paper 2011-01-0350, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0350
- (2) 竹野・星野・千葉・竹本・小笠原 : 「HEV 用 50kW SRM の高出力型と高効率型の実験的特性比較」, 電気学会産業応用, vol. III, pp.407-412 (2011)
- (3) 桑原・小坂・鎌田・梶浦・松井 : 「HEV 駆動用巻線界磁形フラックススイッチングモータの運転性能評価」, 電気学会自動車研究会資料, VT-13-023 (2013)
- (4) 青山・野口 : 「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの基礎検討」, H25 年度電気学会全国大会, no.5-051 (2013)

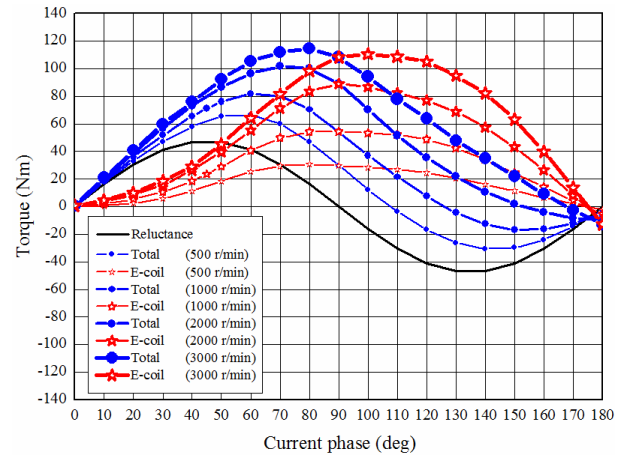


図 14 回転速度に対する電流位相-トルク特性 (273 A_{pk})

Fig. 14. Current phase-torque characteristics with respect to rotation speed at 273 A_{pk}.

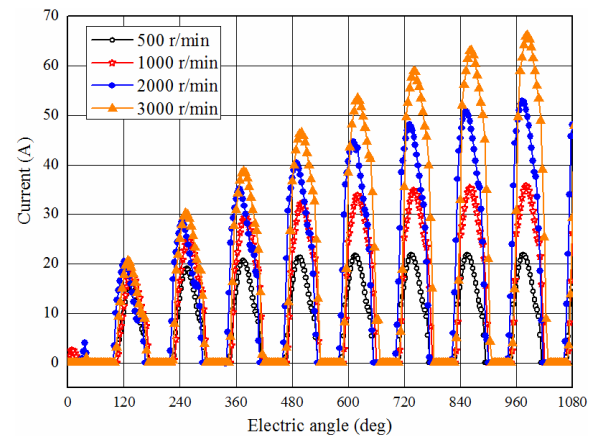


図 15 回転速度に対する正側誘導電流特性 (273 A_{pk})

Fig. 15. Induced current (positive) characteristics with respect to rotation speed at 273 A_{pk} under MTPA control.

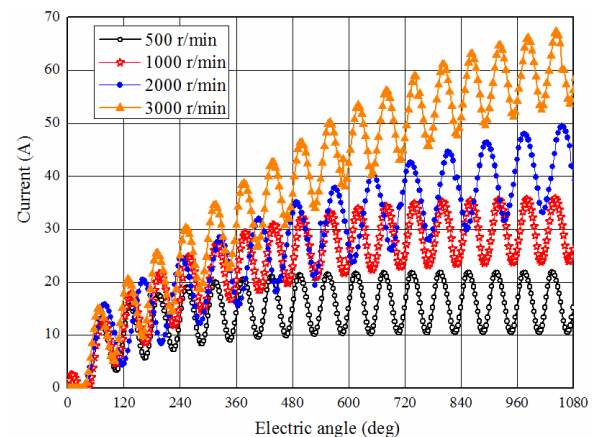


図 16 回転速度に対する界磁電流特性 (273 A_{pk})

Fig. 16. Field current characteristics with respect to rotation speed at 273 A_{pk} under MTPA control.