

# 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アクティブ磁化制御の基礎検討

青山 真大\* (静岡大学, スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study on Active Magnetization Control of 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. Field magnetized quantity becomes weak at the low rotation speed because of reduction of induced voltage on rotor windings. The study on high torque is validated that increase of induced current in secondary side by the current which superimposed pulse in primary side. Consequently, a pulse current is able to supply field magnetization energy is confirmed.

キーワード: 自励式電磁石モータ, 空間高調波, レアアースフリー, 誘導電流, 全波整流, アクティブ磁化制御  
(Keyword, self-excitation motor, space harmonics, rare-earth free, induced current, full-bridge rectifier, active magnetization control)

## 1. はじめに

持続可能な社会を実現するため, 輸送機器メーカーにとってパワートレインのエネルギー効率, CO<sub>2</sub> 排出量の削減および燃費向上は重要な課題の一つである。近年, 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, ガソリンと電気をエネルギー源として化石燃料消費量を大幅に低減するハイブリッドシステムへの取り組みが盛んである<sup>(1)</sup>。そのシステムを構成する電気-機械のエネルギー変換装置として, 専ら高効率な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ム磁石が一般的である<sup>(2)</sup>。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, 今後のハイブリッド自動車 (HEV) 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, 筆者らは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<sup>(3)(4)</sup>。提案したモータは自励式のため, 他

の先行技術として発表されている他励式巻線界磁形モータのように, 三相励磁用インバータに加えて一次側に界磁巻線とチョップ回路を用いる必要がない<sup>(5)</sup>。さらに, 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他励式界磁の問題に対しても有利である。しかし, ロータに巻かれた巻線に空間高調波磁束が鎖交することで発生する誘導電流を整流して界磁エネルギーを得ているため, 低回転速度時ではロータ巻線に誘起される誘起電圧が低くなり界磁量不足でトルクが低下する課題を有していた。本稿では, 低回転速度でのトルク向上の方策として三相交流に高周波パルス電流を重畳し, 時間高調波によって一次側から二次側に界磁エネルギーを供給する基礎検討を行った。電磁界解析にて三相交流に高周波パルス電流を重畳させたときの二次巻線における誘導電流への影響とトルクの動的特性について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モータの諸元と径方向断面図を示す。提案するモータは, 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

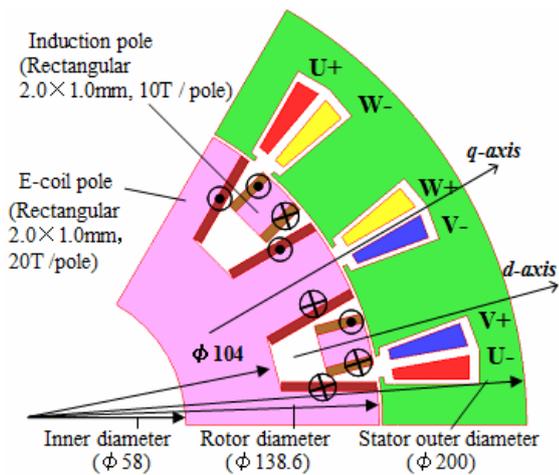


図1 提案モータの断面図

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 <sub>pk</sub>
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

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に鎖交することで発生する誘導電流を整流して電磁石を形成する界磁極（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す。同図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。ここ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3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は端板等でアキシヤル方向から保持する機構を想定している。

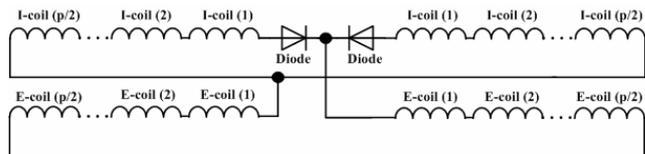


図2 ロータ巻線結線図

Fig. 2. Rotor winding connection diagram.

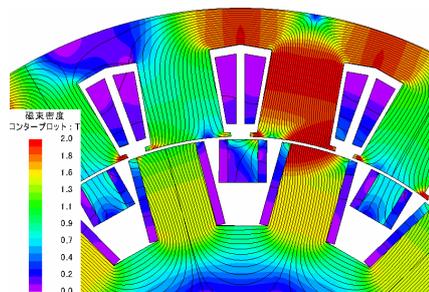
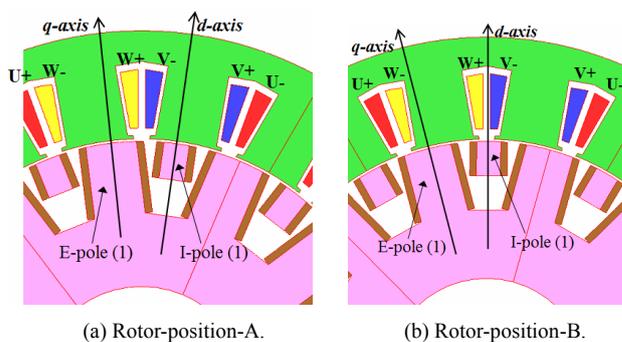


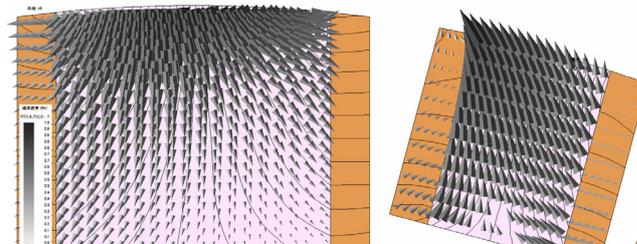
図3 磁束密度分布および磁束線

Fig. 3. Magnetic flux density distribution and flux lines.

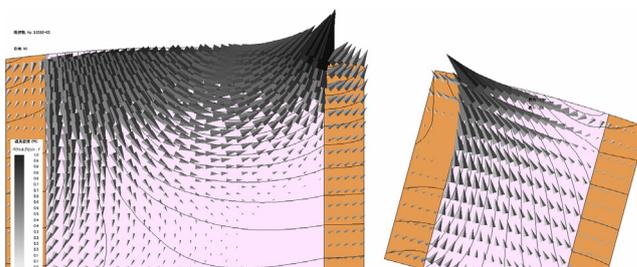


(a) Rotor-position-A.

(b) Rotor-position-B.



(c) Magnetic flux vector of 3<sup>rd</sup> space harmonics at rotor position-A.



(d) Magnetic flux vector of 3<sup>rd</sup> space harmonics at rotor position-B.

図4 ロータ位置における第3次空間高調波分布

Fig. 4. Magnetic flux vector of 3<sup>rd</sup> space harmonics at two rotor positions.

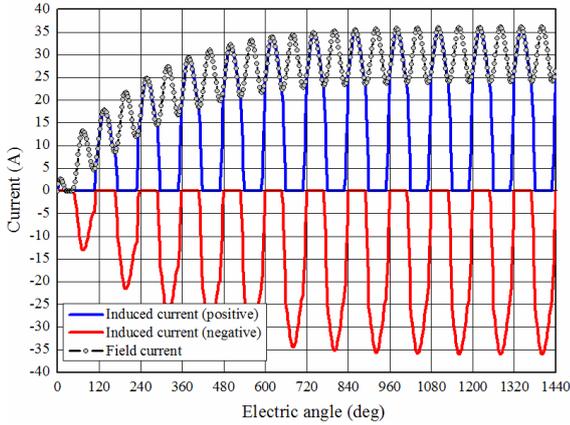


図 5 誘導電流と界磁電流特性

Fig. 5. Induced current and field current characteristics.

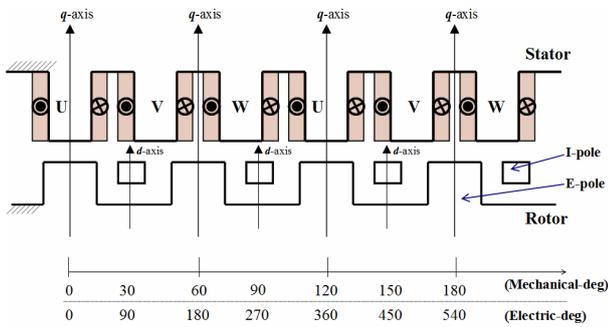


図 6 モータ突極モデル

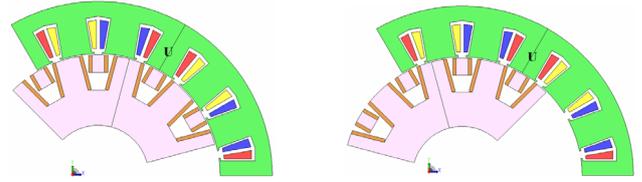
Fig. 6. Salient pole model of proposed motor.

### 3. 自己励磁

〈3・1〉 空間高調波分布 本モータは、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<sup>(4)</sup>。図4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5に空間高調波がI-poleに鎖交することで発生する誘導電流と、全波整流し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<sub>pk</sub>)且つ、電流位相 $\beta=60$  degのときの解析結果を示している。同図より、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 前節で第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 $E_I(\theta, t)$

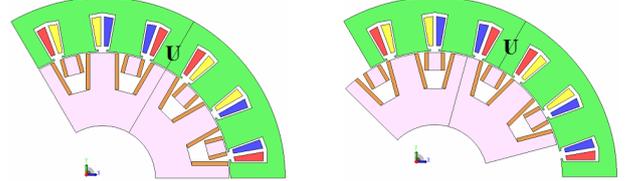


(a) 90 deg (electric).

(b) 270 deg (electric).

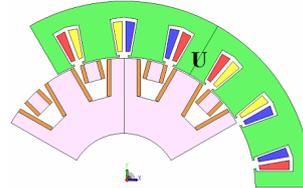
図 7 相互インダクタンスのロータ位置依存性

Fig. 7. Rotor position dependency of mutual inductance.

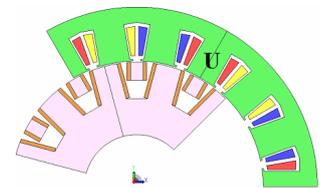


(a) 0 deg (electric).

(b) 90 deg (electric).



(c) 180 deg (electric).



(d) 270 deg (electric).

図 8 ステータの自己インダクタンスのロータ位置依存性

Fig. 8. Rotor position dependency of stator self-inductance.

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6に示したロータの位置基準に対する変位を電気角 $\theta$ 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<sup>(6)</sup>。

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

$$= I_I(t) \frac{\partial L_I(\theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + L_I(\theta) \frac{dI_I(t)}{dt} + I_s(t) \frac{\partial M_{sI}(\theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + M_{sI}(\theta) \frac{dI_s(t)}{dt}$$

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6に示す座標基準で考えたとき図7(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。

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

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

$$M_{sI} = \frac{N_I \phi_I}{I_s(t)} \quad (4)$$

近似条件として、ステータ側の電機子磁束 $\phi_s$ が漏れ分無く、I-coilに鎖交しているとすると、 $\phi_s = \phi_I$ となる。電機子磁束 $\phi_s$ 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

インダクタンス  $L_s(\theta)$  を用いて(5)で表すことができる。

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

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 8(a), (c) のときに最大となり、同図(b), (d) のときに最小となる。よって、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。上記と同様に考えると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。

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

(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  $\omega$  の係数から回転速度に対して変動する値であることが分かる。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  $3\theta$  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。さらに、(9)に示すように電機子電流  $I_s(t)$  に任意周波数の電流を重畳したとき、I-pole に誘起される電圧は(8)で表すことができるため、時間高調波によって一次側から二次側に界磁エネルギーを供給することも可能であると推察される。

$$I_s(t) = I_s \sin(\omega t + \delta) + I_{sh} \sin(n\omega t + \beta_f) \quad (9)$$

#### 4. アクティブ磁化制御

〈4.1〉 高周波電流重畳 前節で時間高調波によって一次側から二次側に界磁エネルギーを供給することが示唆されたので、これを電磁界解析により検証する。解析条件は、500 r/min (基本周波数 50 Hz) において制御に起因して発生する時間高調波を考慮しない正弦波電流に対し 1 kHz の高周波電流を重畳させる。基本波振幅は 273 A<sub>pk</sub> (設計上の最大負荷) とし、高周波電流の振幅は 50 A<sub>pk</sub> とした。基本波の電流位相  $\beta$  は 500 r/min 時に MTPA となる  $\beta=60$  deg,

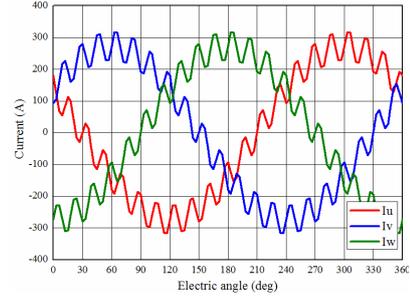
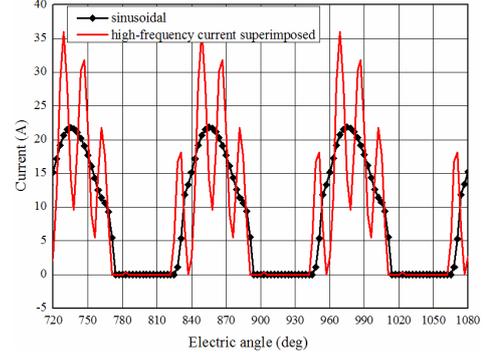
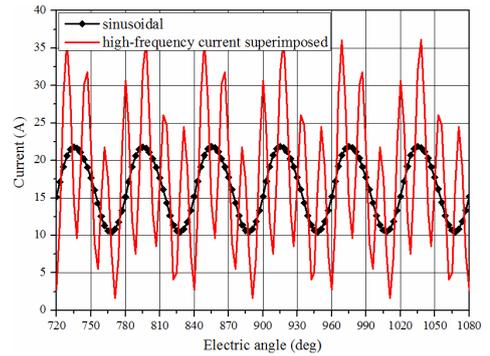


図 9 高周波電流を重畳させた相電流波形

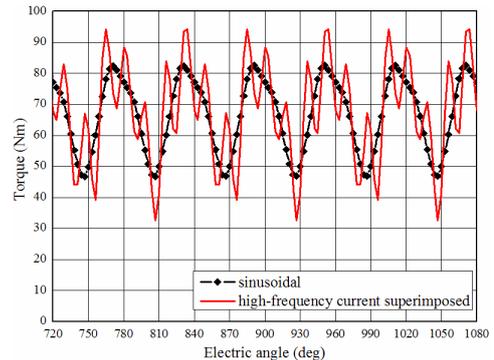
Fig. 9 Phase currents with high-frequency currents superimposed.



(a) Induced current (forward direction).



(b) Field current.



(c) Torque characteristics.

図 10 高周波電流を重畳させたときの特性比較

Fig. 10. Comparison of characteristics under high-frequency current superimposed condition.

高周波電流の位相は基本波と同相とした。図 9 に定常状態における高周波電流を重畳させた電流波形を示し、図 10(a) に定常状態における I-pole の順方向誘導電流特性を示し、同

図(b)に定常状態における E-pole の界磁電流特性, 同図(c)にトルク波形の解析結果を示す。図 10(a)より誘導電流  $I_{rl}$  の電流脈動が増加して基本波振幅が減少してしまっている。さらに図 10(b)より高周波電流を重畳すると同図(a)に起因して界磁電流の脈動が増加してしまいトルク平均値は 1.5 % 増加とほとんど変化が無いのに対し, トルク脈動が悪化する。トルクを増加させるためには(8)の誘起電圧を高くして誘導電流の基本波振幅を増加することが必要である。そこで連続的に高周波電流を重畳するのではなく, 適切なタイミングでパルス電流を重畳することで誘導電流を増加させることを検討した。

**〈4・2〉最適区間におけるパルス電流重畳** 図 10(a)より誘導電流が流れている区間に高周波電流を重畳すると電流脈動が増加して基本波振幅が減少する。一方, 整流の順方向と逆方向の正負切り換わりタイミングに注目してみると, 高周波電流によって有効な誘導電流が誘導されていることが確認できる。そこで, 図 11 に示すように整流の正負切り換わりタイミングのみパルス電流を重畳する手法を検討する。解析条件は, 500 r/min (基本周波数 50 Hz) において制御に起因して発生する時間高調波を考慮しない正弦波電流に対して, 6 kHz のパルス電流を重畳する。基本波振幅は  $273 A_{pk}$  (設計上の最大負荷) とし, パルス電流の振幅は  $100 A_{pk}$  とした。基本波の電流位相  $\beta$  は 500 r/min 時に MTPA となる  $\beta=60 \text{ deg}$  である。図 12(a)に I-pole の順方向誘導電流特性を示し, 同図(b)に E-pole の界磁電流特性, 同図(c)にトルク波形の解析結果を示す。図 12(a)より整流の正負切り換わりタイミングでパルス電流を重畳することで, 誘導電流を時間高調波により誘起させて誘導電流の立ち上がりが高くなっている。すなわち, 最適な区間でパルス電流を重畳することで誘導電流のゲインを高くできていると言える。誘導電流が増加することで図 12(b)に示すように界磁電流も増加し, 図 12(c)に示すようにトルクも 7.7 % 増加する。

**〈4・3〉瞬時最小トルク補償** 前節で整流の正負切り換わりタイミングでパルス電流を重畳すると誘導電流の立ち上がりが高くなり, 時間高調波によって誘導電流を誘起させることができた。更にトルク特性を向上するためには, 瞬時最小トルクを増加させることが有効である。図 12(b)と同図(c)で瞬時最小トルクと界磁電流波形を比較すると界磁電流量で瞬時最小トルクが変化することがわかる。すなわち, 瞬時最小トルクを補償してトルク特性を向上させるためには界磁電流を増加する必要がある。整流の正負切り換わりタイミング後の誘導電流を増加させるために図 13 に示すように区間的に電流指令値を増加させることを検討する。図 11 の相電流に対し基本波振幅を  $100 A_{pk}$  区間的に増加させている。図 14 に図 13 の相電流波形で駆動させたときの効果を前節の結果と比較して示す。同図(a)に I-pole の順方向誘導電流を示し, 同図(b)に E-pole の界磁電流, 同図(c)に定常時のトルク波形を示す。同図より区間的に電流指令値を増加させることで誘導電流が増加して界磁電流も増加していることがわかる。以上の結果, 瞬時最小トルクが

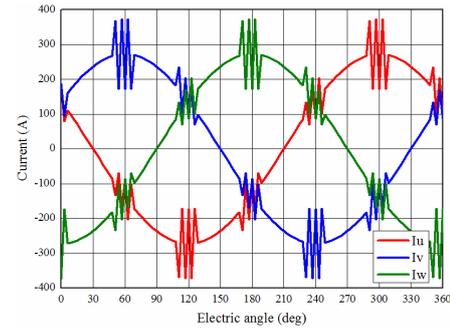
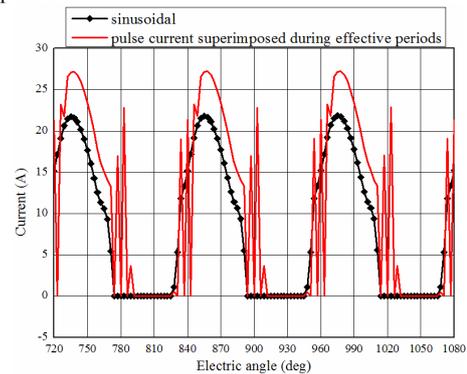
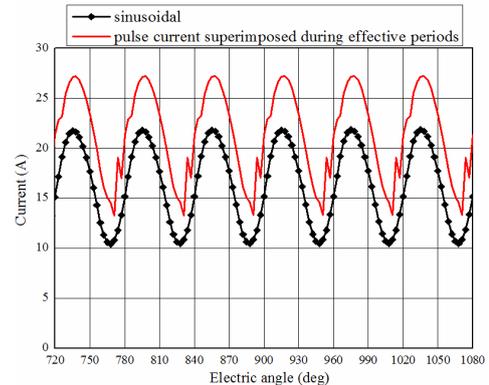


図 11 区間的にパルス電流を重畳した相電流

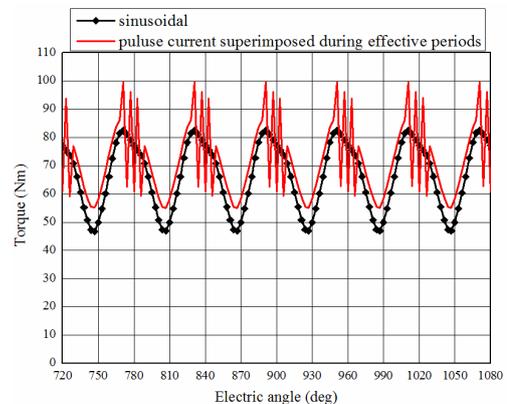
Fig. 11. Phase currents with pulse currents superimposed during effective periods.



(a) Induced current (forward direction).



(b) Field current.



(c) Torque characteristics.

図 12 最適区間でパルス電流を重畳したときの特性比較

Fig. 12. Comparison of characteristics under pulse current superimposed condition during effective periods.

増加することで区間的なパルス電流重畳のみに対してさらに8.4%トルクが増大し、純正弦波駆動（アクティブ磁化制御なし）に対しては16.7%トルクが増大する。

## 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、時間高調波によって一次側から二次側に界磁エネルギーを供給することが可能であることも示した。時間高調波による界磁エネルギー供給について電磁界解析を行い、三相交流に高周波またはパルス電流を重畳したときの二次巻線での誘導電流への影響とトルクの動的特性について検討した。その結果、連続的に高周波電流を重畳すると時間高調波と空間高調波の干渉が発生して誘導電流が減少するためにトルクが低下することがわかった。しかし、順方向誘導電流と逆方向誘導電流の正負切り換わりタイミングでパルス電流を区間的に重畳すれば、空間高調波と時間高調波の干渉が発生せず誘導電流を増加できることがわかった。更に、瞬時最小トルクの区間で電流指令値を増加させることで界磁電流が増大し、トルク特性を向上できることも明らかになった。電磁界解析の結果、500 r/minの最大負荷且つMTPA駆動時に最適な区間にパルス電流を重畳することでアクティブ磁化制御なしに対して7.7%トルクが増大し、瞬時最小トルク補償を行うことで16.7%トルクが増大する結果を得た。

今後は、提案モータの数学モデルについて検討を進めることでアクティブ磁化制御の最適な制御方法を検討するとともに、実機試作を行い性能評価を進める予定である。

## 文 献

- (1) 神谷・久保：「ハイブリッド車における燃費向上技術の動向」, 電学論D, vol.120, no.11, pp.1251-1256 (2000)
- (2) 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
- (3) 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)
- (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可変速特性」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会資料, SPC-13-070, MD-13-012 (2013)
- (5) 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)
- (6) 難波江・金・高橋・中村・山田：「基礎電気機器学」, オーム社, pp.76-83 (1985)

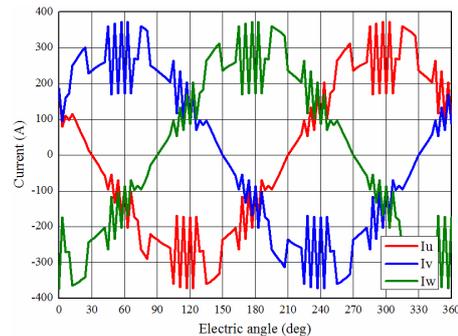
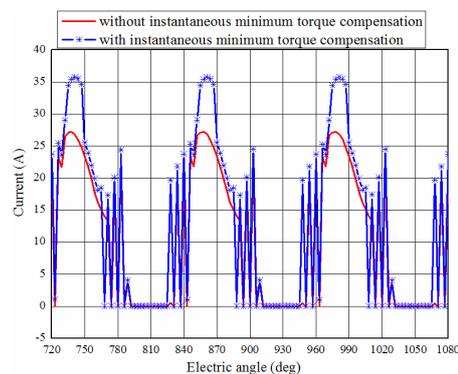
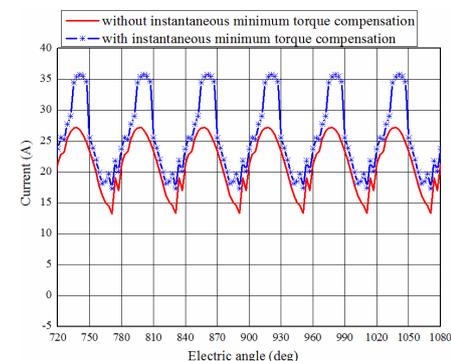


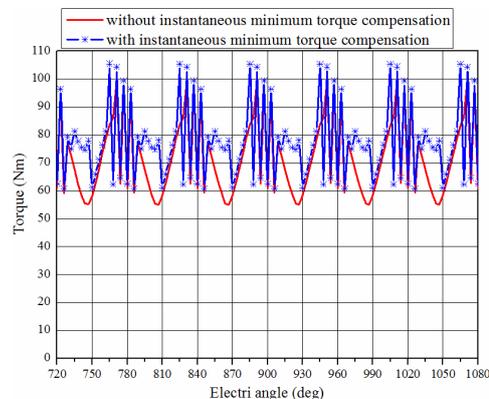
図13 区間的にパルス電流重畳と電流指令値を増加した相電流  
Fig. 13. Phase currents with pulse currents superimposed and increased currents command during effective periods.



(a) Induced current (forward direction).



(b) Field current.



(c) Torque characteristics.

図14 瞬時最小トルク補償有無の特性比較  
Fig. 14. Comparison of characteristics with or without instantaneous minimum torque compensation.