

# キャリア高調波による磁界共振結合と第2次空間高調波による電磁誘導結合を併用した自励式巻線界磁形同期モータの提案

青山 真大\*, 野口 季彦 (静岡大学)

Proposal of Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Inductive Coupling with Second-Space Harmonic and Resonant Inductive Coupling with Carrier Harmonic  
Masahiro Aoyama\*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper proposes a self-excitation technique with carrier harmonic that occur inevitably in the motor driven by an inverter and with second-order space harmonic structurally unavoidably generated by a concentrated winding stator. It features as a brushless power supply to the rotor winding by resonant inductive coupling and inductive coupling respectively. The explanation of the proposed principle and the fundamental drive characteristics with respect to carrier harmonic are reported.

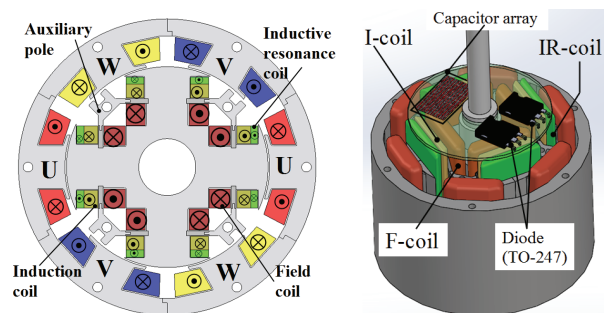
キーワード: キャリア高調波, 空間高調波, 自己励磁, 巻線界磁形同期モータ, 磁石フリー, 強め界磁  
(Keyword: carrier harmonic, space harmonic, self-excitation, wound-field synchronous motor, magnet-free, flux-intensifying)

## 1. はじめに

近年, 輸送機器分野において低燃費化の一解決策として電動化技術開発が加速的に進められている<sup>(1)</sup>。電動パワートレインの駆動源となるモータは, 高効率且つ高トルク密度の観点から永久磁石式同期モータ (IPMSM) が広く採用されている<sup>(1)-(3)</sup>。一方で 2010 年の希土類価格高騰を契機に磁石フリーモータの研究開発や更なる高効率エリア拡大を目的とした可変界磁技術が様々な研究機関で進められており, 次世代モータに対する期待が高まっている。このような背景の下, 筆者らは磁石フリーモータの可能性としてブラシレス給電可能な自励式ダイオード整流巻線界磁形同期モータの研究開発を進めてきた<sup>(5)</sup>。ダイオード整流巻線界磁形同期モータの歴史は長く, 1958 年に野中先生が発表した自励形単相同期電動機を起源とし, その後, 三相モータへと技術展開していき, 自励源として空間高調波や時間高調波を活用する方法が提案されている<sup>(6)-(14)</sup>。前者の空間高調波を利用する場合, 90 年代に分布巻ステータの巻線構造を工夫することで故意に第 2 次空間高調波を発生させて自励する方法が提案され, 近年は集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波を界磁源として利用する方法が提案されている<sup>(5), (10)-(14)</sup>。しかし, ファラデーの法則に基づくため, 原理的に低回転域に界磁を形成する十分な界磁電流を得ることができず, トルクの低下が問題となっていた。一方, 後者の時間高調波を利用する場合, 90 年代前半に  $d$  軸に任意の高調波電流を重畳して自励に利用する方法が提

案されたが, 制御的に高回転域での時間高調波重畳が困難である点と高調波電流に起因した損失増加とトルクリプル増加が問題となる<sup>(8), (9)</sup>。近年は, 空間高調波を自励に利用したモータの低回転域のトルク向上を目的に, 適切なタイミングでパルス電流を重畳して時間高調波による自励も組み合わせ合わせた強め界磁技術も報告されている<sup>(15), (16)</sup>。しかし, この技術の場合, パルス電流によるシステム効率低下とスパイク状のトルクリプルが発生するという問題がある。

上記の課題に鑑みて, 本論文では空間高調波自励式モータの低回転域のトルク向上を目的に, 作為的に特定の高調波を印加せず, 電圧形インバータ駆動されるモータで PWM 制御時に制御的に不可避に発生するキャリア周波数成分 (キャリア高調波) を強め界磁に利用する技術の提案と原理説明を行い, 電磁界解析による基礎性能予測結果を報告する。



(a) Cross section diagram. (b) Prototype structure.  
Fig.1. Proposed motor.

Table I. Specifications of prototype.

|   |     |
|---|-----|
| Stator outer diameter (mm)                            | 125 |
| Stack length (mm)                                     | 80  |
| Pole pairs  | 2   |
| Number of stator slots                                | 6   |
| Armature winding resistance ( $\Omega$ /coil)         | 2.0 |
| Induction-coil resistance ( $\Omega$ /coil)           | 1.4 |
| Field-coil resistance ( $\Omega$ /coil)               | 1.4 |
| Inductive-resonance coil resistance ( $\Omega$ /coil) | 0.4 |
| Number of Induction-coil turn                         | 110 |
| Number of Field-coil turn                             | 110 |
| Number of Inductive-resonance-coil turn               | 20  |

## 2. キャリア高調波による強め界磁原理

〈2・1〉 提案モータ Fig. 1 に検証用モータを示し、Table I に主要諸元を示す。実機検証を見据えて、4 極 6 スロット (スロットコンビネーションが 2:3 系列) の集中巻ステータの巻線界磁形同期モータ (WFSM) である。Fig. 2 にロータ巻線結線回路図を示す。従来の空間高調波で自励するモデルに対する特長として、空間高調波から誘導起電力を得る誘導コイル (I-coil) とキャリア高調波から誘導起電力を得る誘導共振コイル (IR-coil) がそれぞれダイオードを介して界磁コイル (F-coil) に並列結線されている。前者の I-coil は電磁誘導結合により誘導起電力を得るのに対して、後者の IR-coil はキャリア高調波を共振周波数として LC 直列共振回路を構成して磁界共振結合により誘導起電力を得る。

Fig. 3 に電磁界解析 (汎用ソフトウェア JMAG-Designer ver. 17 使用) により求めた第 2 次空間高調波の磁束分布およびキャリア周波数を 2 kHz としたときのキャリア高調波の磁束分布を示す。同図に示すように、ロータ突極に第 2 次空間高調波およびキャリア高調波が鎖交していることを確認できる。キャリア高調波のほうギャップ近傍に鎖交磁束が分布するため、Fig. 1 に示すようにロータ外径側に IR-coil を配置し、キャリア高調波の鎖交磁束量の増加を狙っている。I-coil においてもロータ突極先端部に鎖交磁束が集中するため、IR-coil の次にロータ外径側へ配置している。一方、F-coil は界磁極を形成するコイルのため、高調波磁束が鎖交して誘導起電力が発生するのは望ましくない。従って、ロータ内径側に配置することで高調波磁束の鎖交を防ぎ、一定起磁力の界磁形成ができるようにしている。

〈2・2〉 磁界共振結合による強め界磁 前節で述べたとおり、提案モータはキャリア高調波  $F_c$  を共振周波数  $F_r$  とした LC 直列共振回路で磁界共振結合にて自励する。従来、インバータ駆動のモータで不可避に発生するキャリア高調波は鉄損や電機子巻線の導体渦電流損の発生源となりモータ性能を低下させていたが、本技術によりトルクの向上に活用できる。一方、(1) で表されるように自己インダクタンス  $L_{IR}$  および共振キャパシタンス  $C$  の組み合わせで  $F_r$  が決まるが、Fig. 1(b) に示すようにロータ上のキャパシタアレイは可変容量にせず、固定にするほうが望ましい。

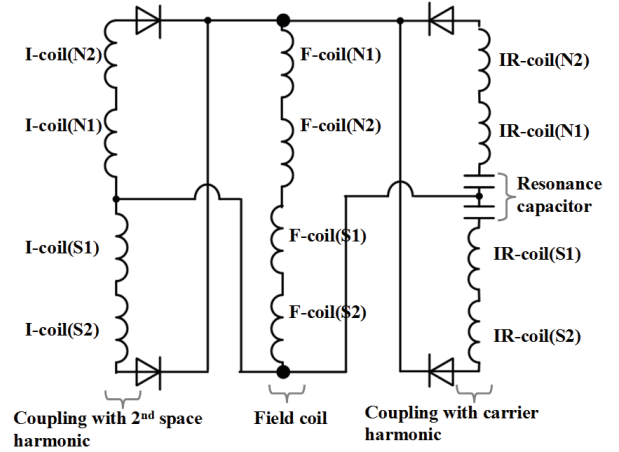
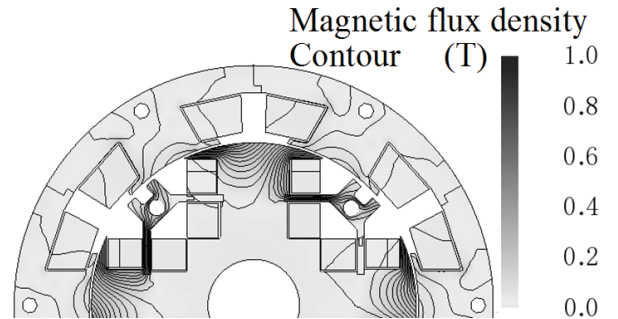
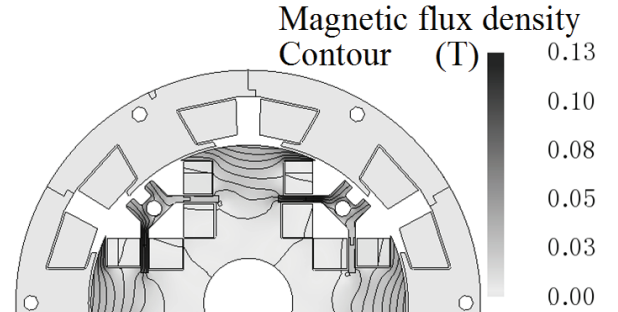


Fig. 2. Rotor winding connection circuit.

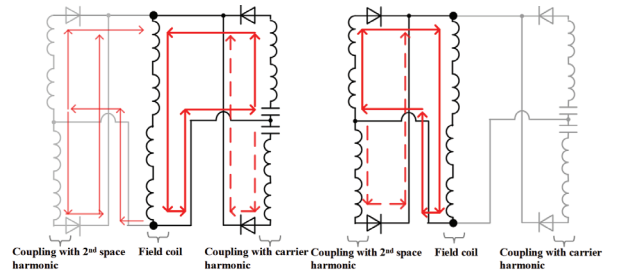


(a) Second-order space harmonic.



(b) Carrier harmonic (2 kHz).

Fig. 3. Harmonic flux distribution.



(a) Under low-rotation speed. (b) Over middle-rotation speed.

Fig. 4. Rotor winding circuit passively switched at rotation speed.

$$F_r = F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{IR}C}} \quad (1)$$

一方、当該モータは電機子起磁力、電流位相および回転速度によって界磁電流が受動的に変動する可変界磁モータのため、インダクタンスが動的に変動する<sup>(17)</sup>。その結果、界磁極の磁化量が変化することにより共振状態から非共振状態になることが予測される。非共振時はLC直列共振回路のインピーダンス  $Z_{IR}$  が(2)で表されるため、高インピーダンスとなる。ここで  $R_{IR}$  は  $L_{IR}$  の巻線抵抗値である。

$$Z_{IR} = R_{IR} + j\left(\omega L_{IR} - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2)$$

上記の理由により、電磁誘導結合により空間高調波で自励する回路と磁界共振結合によりキャリア高調波で自励する回路は直列結線ではなく、界磁コイルに対してダイオードを介して並列結線することが望ましい。このとき、低回転域のインダクタンス  $L_{IR}$  にて共振周波数  $F_r (=F_c)$  で共振するように共振キャパシタンス  $C$  を決定することで Fig. 4(a)に示すようにキャリア高調波で自励する強め界磁が可能になる。一方、回転速度が増加することで空間高調波による自励で界磁極の磁化量が増加し、インダクタンス  $L_{IR}$  が変化することで Fig. 4(b)に示すように非共振状態となり、空間高調波のみで自励する。

なお、上記以外の方法としてキャリア周波数  $F_c$  を共振状態に応じて変更する方法が考えられる。紙面の都合上、本稿では述べて別紙に譲る。

### 3. 電磁界解析による性能予測

**〈3・1〉 可変速特性** 基礎検討として、キャリア周波数  $F_c = 2$  kHz で駆動させたときの可変速特性を電磁界解析により予測した。すなわち、LC直列共振回路を共振周波数  $F_r = 2$  kHz でインピーダンスマッチングさせ、比較対象として非共振時の場合（共振キャパシタンスが存在しない回路）の駆動特性も予測した。電機子起磁力が 389 AT（電機子電流  $5 A_{pk}$ ）で電磁石トルクのみ（ $d$  軸電流  $i_d = 0$  制御）時のトルク特性を Fig. 5 に示し、Fig. 6 にトルクリブルの比較、Fig. 7 に界磁電流波形を示す。ここで、ロータ突極を  $d$  軸、突極間を  $q$  軸で定義する。なお、非共振時（Fig. 2 で共振キャパシタンスが存在しない回路）は従来の空間高調波による自励の場合のモデルと同様になるため、各図において "Conventional" と記載している。Fig. 5 より平均トルクの向上（100 r/min 時は+36.6%、200 r/min 時は+28.7%、400 r/min 時は+18.3%、700 r/min 時は+11.9%、1000 r/min 時は+7.7%）に加えて、トルクリブルの低減も確認できる。なお、Fig. 6 において従来モデル ("Conventional") を  $T_{rc}$ 、提案モデル ("Proposed") を  $T_{rp}$  で表記している。トルクリブルの定義は電気角 1 周期の範囲で瞬時最大トルクと瞬時最小トルクの差分を平均トルクで除している。同図より、400 r/min 時において  $T_{rc} = 95.7\%$  に対して  $T_{rp} = 76.0\%$  である。前述したとおり、当該モータは可変界磁原理で  $d$  軸インダクタンスが回転速度とともに大きく変動する。低回転域のトルク向上を狙ってインピーダンスマッチングを 100 r/min 時のインダクタンスで行ったため、回転速度の増加とともにキャリ

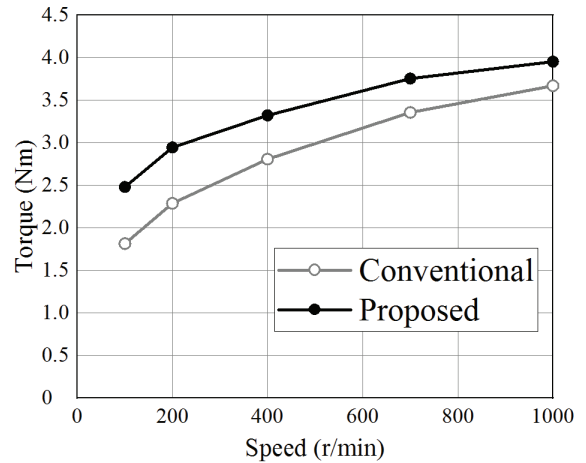


Fig. 5. Torque characteristics with respect to rotation speed under 389 AT.

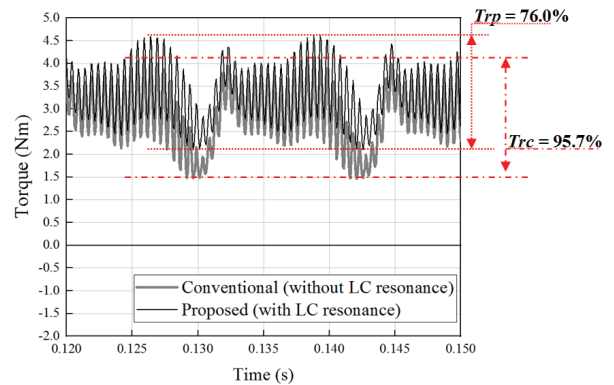


Fig. 6. Torque ripple under 389 AT at 400 r/min.

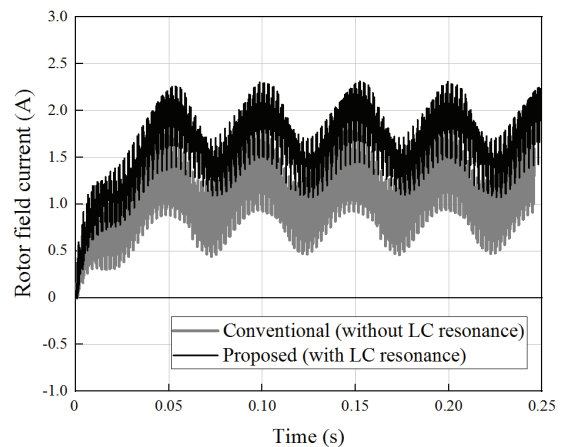


Fig. 7. Rotor field current under 389 AT at 400 r/min.

ア高調波による強め界磁効果が低下していることを Fig. 5 から確認できる。トルクリブルに関してはキャリア高調波による強め界磁効果でロータ磁化量が増加し、パーミアンス変動を低減できることでトルクリブルを低減することができている。上記は Fig. 7 で従来モデルに対して提案モデルの界磁電流が増加していることから確認できる。上記を更に詳細に分析するため、トルク波形をフーリエ級数展開し

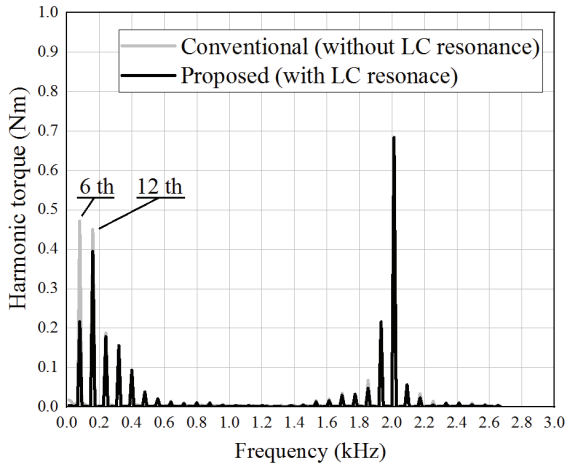


Fig. 8. Harmonic contents of torque under 389 AT at 400 r/min.

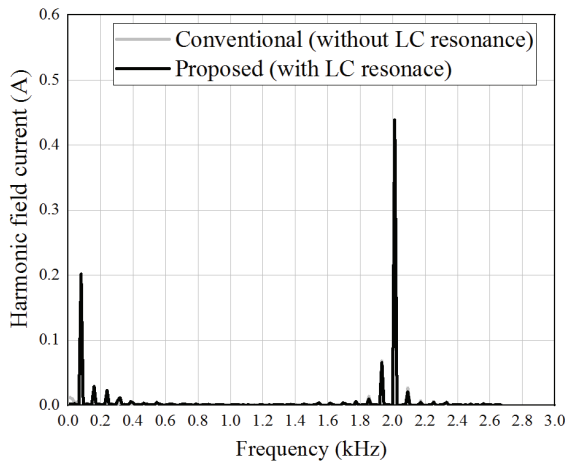
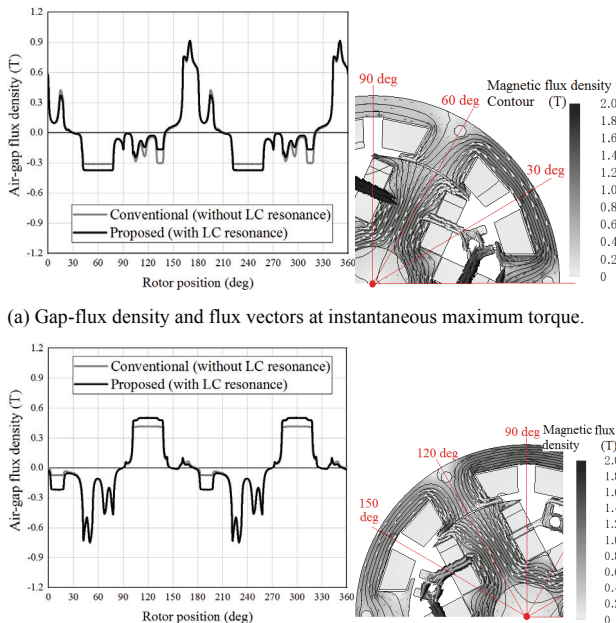


Fig. 9. Harmonic contents of field current under 389 AT at 400 r/min.



(a) Gap-flux density and flux vectors at instantaneous maximum torque.

(b) Gap-flux density and flux vectors at instantaneous minimum torque.

Fig. 10. Air-gap flux density with respect to rotor position.

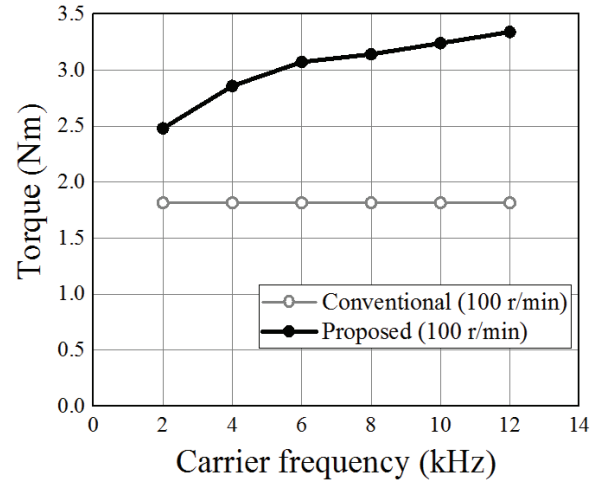


Fig. 11. Torque characteristics with respect to resonant frequency under 389 AT at 100 r/min.

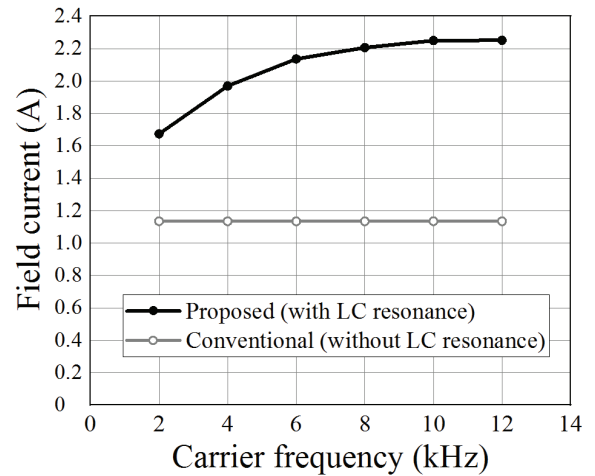
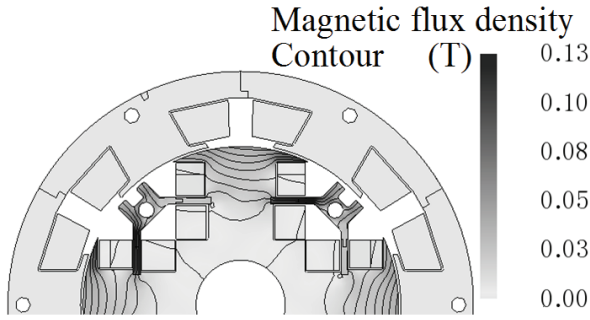


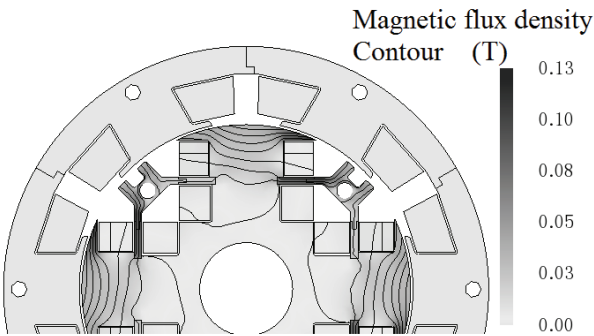
Fig. 12. Field current characteristics with respect to resonant frequency under 389 AT at 100 r/min.

て高調波成分別に評価した結果を Fig. 8 に示し、Fig. 9 に界磁電流の調波解析結果を示す。両図より、界磁電流の高調波成分に差が見られないが一方で電気角 6 次と 12 次の高調波トルクにおいて、提案モデルは従来モデルよりも低減できている。Fig. 10 よりギャップ磁束密度波形を比較すると提案モデルのほうがギャップ磁束密度が高い。特に瞬時最大トルクにおけるロータ位置が 45 deg から 75 deg の区間、瞬時最小トルクにおけるロータ位置が 100 deg から 130 deg の区間はそれぞれ周方向の電磁力がほとんど発生しておらず径方向の電磁力が支配的なロータ位置である。上記のロータ位置で提案モデルのギャップ磁束密度が高いことからキャリア高調波による強め界磁効果で界磁極の磁化量が増加し、二重突極構造に起因したパーミアンス変動が低減したことでトルクリプルの低減ができていると考えられる。

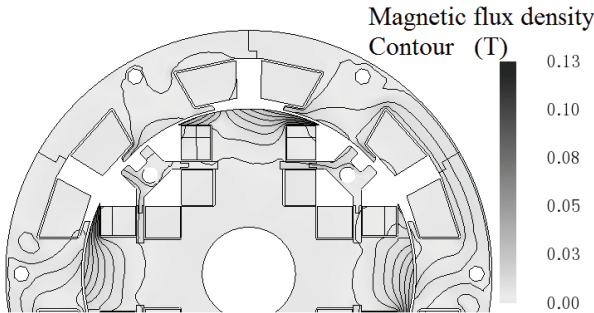
〈3・2〉 キャリア周波数に対する駆動特性 次に、キャリア周波数  $F_c$  を変化させ、それに伴い  $F_r = F_c$  となるよう



(a) Carrier frequency  $F_c = 2$  kHz.



(a) Carrier frequency  $F_c = 4$  kHz.



(a) Carrier frequency  $F_c = 12$  kHz.

Fig. 13. Harmonic flux distribution with respect to carrier frequency.

に共振キャパシタンス  $C$  を変更させたときのトルク特性との関係を電磁界解析で予測する。前節ではキャリア周波数  $F_c = 2$  kHz での駆動特性を示したが、本節では回転速度  $N = 100$  r/min を固定としてキャリア周波数  $F_c$  を変化させたとき、すなわち共振周波数  $F_r$  を変化させたときのトルク特性を Fig. 11 に示す。同図より、平均トルクは  $F_c = 4$  kHz 時は +57.5 %、 $F_c = 6$  kHz 時は +69.2 %、 $F_c = 8$  kHz 時は +73.0 %、 $F_c = 10$  kHz 時は +78.5 %、 $F_c = 12$  kHz 時は +84.0 %、それぞれ向上した。Fig. 12 に Fig. 11 に対応する界磁電流の平均値を示す。同図より、キャリア周波数の増加とともに界磁電流の平均値も増加しており、この結果からキャリア周波数  $F_c$  を増加させることでキャリア周波数で磁界共振結合する IR-coil における誘導起電力が増加し、その結果界磁電流が増加して界磁極の磁化量が増加することでトルクが増加したことが

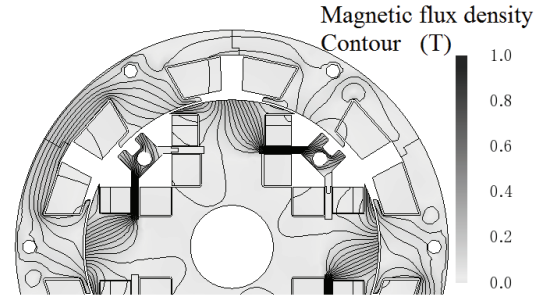


Fig. 14. Second space harmonic distribution at carrier frequency 2 kHz.

わかる。一方、キャリア周波数  $F_c$  が高くなることで磁束の時間変化が増加するため、線形関係でトルクや界磁電流の平均値が増加すると予測されるが実際には Fig. 11 や Fig. 12 からも確認できるように異なる。この要因として、Fig. 13 に示すようにキャリア周波数が増加することでロータ突極に鎖交するキャリア高調波磁束が減少し、その結果、IR-coil に鎖交するキャリア高調波鎖交磁束量が減少して誘導起電力が線形増加しないと考えられることができる。本結果は、提案モータをキャリア高調波を利用して強め界磁する場合、トルクとインバータまで含めたシステム効率で最適なキャリア周波数が存在することを意味している。これらの検討については今後、試作機を用いた実機評価試験にて検証を行う予定である。

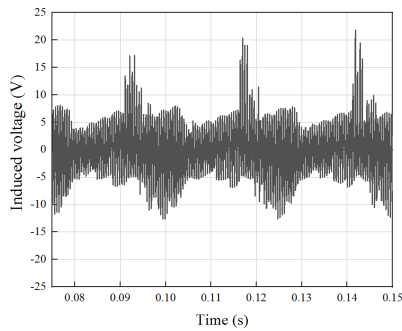
〈3・3〉誘導起電力の振幅変調 提案モータのキャリア高調波による強め界磁効果を左右する重要な設計項目として、前節の共振周波数  $F_r$  の決定に加えて  $Q$  値が挙げられる。当該モータにおいて、第 2 次空間高調波とキャリア高調波がそれぞれロータ突極に鎖交し、I-coil または IR-coil において、それぞれの高調波磁束から起電力を得ている。Fig. 14 に示すようにキャリア周波数  $F_c$  を変化させた場合においても空間高調波の分布に差は生じない。そのため、IR-coil において、 $Q$  値によってはキャリア高調波の振幅が第 2 次空間高調波（ロータ上では第 3 次時間高調波）によって時間的に緩やかに変化する振幅変調が生じる。（第 2 次空間高調波は被変調波の包絡線に相当する。）キャリア高調波および第 3 次時間高調波（基本波同期回転座標上から第 2 次空間高調波を観測）をそれぞれ  $\psi_c$  および  $\psi_{3rd}$  とすると、次式のように書き表すことができ、IR-coil に鎖交する磁束の側帯波  $\psi_{IR}$  は(5)のようになる。

$$\psi_c = \phi_c \cos \omega_c t \quad (3)$$

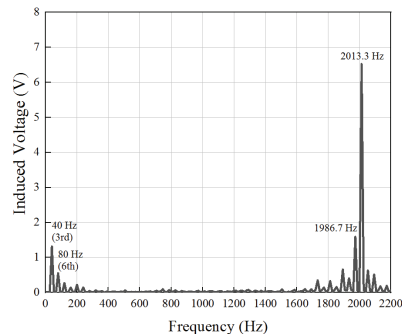
$$\psi_{3rd} = \phi_{3rd} \cos \omega_{3rd} t \quad (4)$$

$$\psi_{IR} = \psi_c \cdot \psi_{3rd} = \frac{\phi_c \phi_{3rd}}{2} \{ \cos(\omega_c + \omega_{3rd}) t + \cos(\omega_c - \omega_{3rd}) t \} \quad (5)$$

(5)において、 $\omega_c = 12566.4$  rad/s ( $F_c = 2$  kHz)、 $\omega_{3rd} = 83.8$  rad/s（ロータ回転速度 400 r/min、13.3 kHz）のとき、 $\psi_{IR}$  の側帯波は 1986.7 Hz と 2013.3 Hz となる。Fig. 9 および Fig. 15 を確認すると、キャリア周波数  $F_c = 2$  kHz のほかに上記の側帯波成分が発生していることを確認できる。上記より、当



(a) Induced voltage in IR-coil with open windings.



(b) Harmonic contents.

Fig. 15. Induced voltage in IR-coil with open-windings at carrier frequency 2 kHz under 389 AT and 400 r/min.

該モータは  $Q$  値も性能を左右する重要な設計パラメータになることがわかる。

次に、ロータ回転速度 100 r/min、電機子起磁力 389 AT、キャリア周波数  $F_c = 2$  kHz の条件下で共振キャパシタンスの容量を変更して共振周波数を変更 ( $F_c \neq F_r$ ) したときのトルク特性を電磁界解析により求めた。その結果を Fig. 16 に示す。同図より、現状の設計では約  $\pm 300\%$  の範囲で共振周波数から外れたとしてもトルク特性に大きな変化がないことがわかる。一方、現状の設計から更に高  $Q$  値の設計をすることでトルク特性が変化することも推察できる。

#### 4. まとめ

本稿では、集中巻ステータ構造で不可避に発生する第 2 次空間高調波で自励する巻線界磁形同期モータの低回転域のトルク向上を目的に、インバータ駆動時に不可避に発生するキャリア高調波から磁界共振結合により起電力を得て強め界磁するモータを提案した。電磁誘導結合により第 2 次空間高調波から起電力を得ながら、磁界共振結合によりキャリア高調波から起電力を得るロータ巻線回路の考え方について説明し、電磁界解析により提案する原理の検証を行った。また、キャリア高調波の周波数を変化させたときのトルク特性の予測を行い、キャリア高調波の周波数とトルク特性の関係を明らかにした。

今後は、原理検証用試作機を用いて机上理論の検証を行う。さらに、実験的に駆動特性（トルク、可変速、効率マップ）を明らかにするとともに、システム効率まで含めた最適なキャリア周波数の検討および共振状態に応じて最適

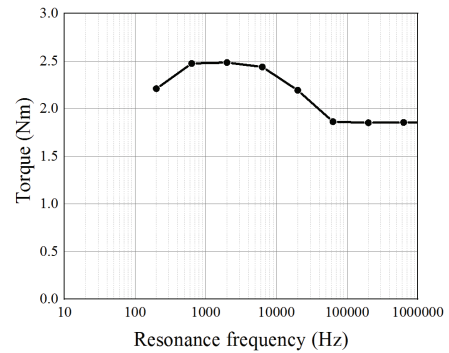


Fig. 16. Resonance frequency-vs.-torque characteristics at carrier frequency 2 kHz under 389 AT and 100 r/min.

なキャリア周波数に変化させる制御手法等を考究する。

#### 文 献

- (1) 水谷・春野・水谷：「自動車用電動力応用システムの技術動向 I トヨタにおける小型ハイブリッド自動車用モータの開発ー」、平成 29 年電気学会産業応用部門大会, No. 4-S10-6, pp. 58-62 (2017).
- (2) T. Yashiro, S. Sano, K. Takizawa, T. Mizutani: "Development of New Motor for Compact-Class Hybrid Vehicle", *International Electric Vehicle Technology Conference Automotive Power Electronics (EVTec & APE Japan), 2016 SAE of Japan*, No. 20169091 (2016).
- (3) S. Jurkovic, K. Rahman, B. Bae, N. Patel, and P. Savagian: "Next Generation Chevy Volt Electric Machines: Design, Optimization and Control for Performance and Rare-Earth Mitigation", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE*, pp. 5219-5226 (2015).
- (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」、平成 25 年電気学会全国大会, No. 5-051, pp. 91-92 (2013).
- (5) 青山・野口：「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ形磁石フリーモータの実機検証」、電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015).
- (6) 野中：「自励形単相同期電動機」、電気学会論文誌, Vol. 78, No. 842, pp. 407-412 (1958).
- (7) 野中・袈裟丸・堀田：「励磁なしブラシレス三相同期発電機の解析」、電気学会論文誌 D, Vol. 112, No. 5, pp. 483-489 (1992).
- (8) 小山・鳥羽・樋口・山田：「半波整流ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」、電気学会論文誌 D, Vol. 107, No. 10, pp. 1257-1264 (1987).
- (9) 小山・樋口・安部・山田：「交流励磁方式ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」、電気学会論文誌 D, Vol. 109, No. 7, pp. 515-522 (1989).
- (10) 深見・高・宮本・柴田：「三相同期発電機の新しい自己励磁法」、電気学会論文誌 D, Vol. 114, No. 11, pp. 1083-1089 (1994).
- (11) 深見・花田・宮本：「第 2 次空間高調波で励磁する自励三相同期発電機の解析」、電気学会論文誌 D, Vol. 117, No. 1, pp. 57-65 (1997).
- (12) 青山・野口：「空間高調波を利用した自励式磁石フリーモータの回転子補極によるトルク特性改善」、電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 2, pp. 169-181 (2016).
- (13) 平本・中井・加納・山田・水谷：「ダイオード整流型磁石フリーモータの提案と原理検証」、電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 1, pp. 54-60 (2016).
- (14) 大場・阿部・樋口：「クローポール型半波整流可変界磁モータの一次設計」、電気学会全国大会, pp. 95-96 (2014).
- (15) 平本・中井・鈴木・山田・水谷：「ダイオード整流型磁石フリーモータの低回転域のトルク向上」、電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 10, pp. 784-790 (2016).
- (16) 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アクティブ磁化制御の基礎検討」、電気学会研究会資料, RM-13-44, pp. 49-54 (2013).
- (17) 森川・松尾・許・名取・近藤・青山・大塚：「空間高調波を利用した自励式巻線界磁形同期モータのインダクタンス同定と評価」、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-17-023, MD-17-023 (2017).