

キャリア高調波で強め界磁する空間高調波 自励式ダイオード整流巻線界磁形同期モータ

青山 真大*, 野口 季彦 (静岡大学)

Self-Excited Diode Rectifying Wound-Field Synchronous Motor
Utilizing Space Harmonics and Flux-Intensifying with Carrier Harmonics
Masahiro Aoyama*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

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。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) が広く一般的に採用されている。一方で 2010 年の希土類価格高騰を契機とし、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に可変界磁技術の研究が様々な研究機関で進められている。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いる⁽¹⁾。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、空間高調波や時間高調波を自励に活用する方法が提案されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。前者の空間高調波を利用する場合、近年は集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波を自励に利用しているが、原理的に低回転時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⁽¹⁾⁽⁵⁾。後者の時間高調波を利用する場合、 d 軸に任意の高調波電流を重畳して自励に利用しているが、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⁽³⁾。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を組み合わせた強め界磁技術も報告されている⁽⁶⁾。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った。

上記の課題に鑑みて、本論文では空間高調波自励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、PWM インバータの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。

2. キャリア周波数成分による強め界磁原理

Fig. 1 に提案するモータの径方向断面図を示す。ステータ

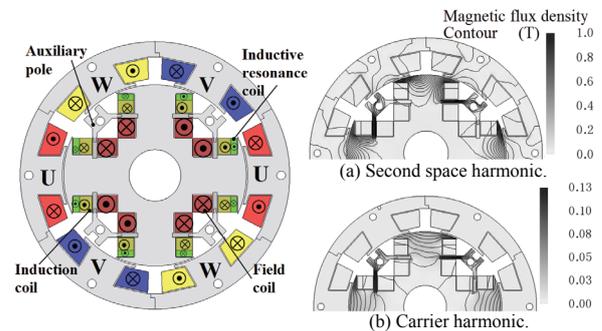
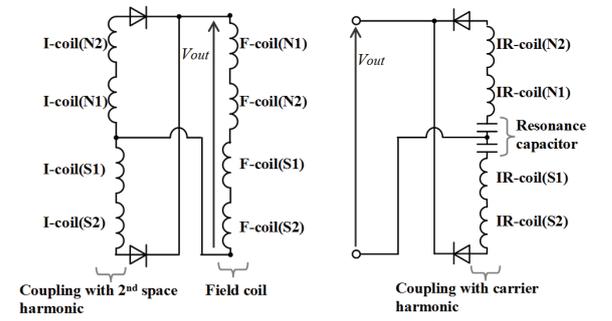


Fig. 1. Proposed motor.

Fig. 2. Harmonic flux distribution.



(a) Inductive coupling type rotor windings circuit for second-order space harmonic.

(b) Inductive resonance coupling type rotor windings circuit for carrier harmonic.

Fig. 3. Rotor windings circuits.

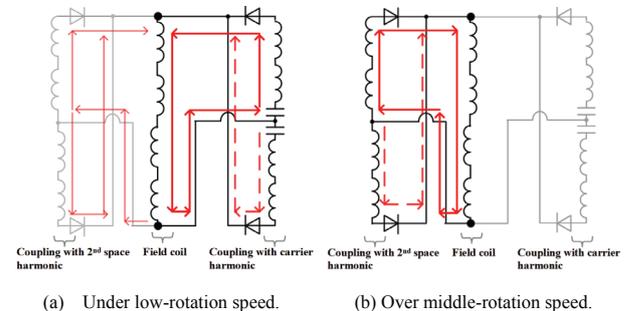


Fig. 4. Rotor winding circuit passively switched at rotational speed.

コア外径が $\phi 125$, 積厚が L80, ステータ巻線抵抗は 2.0Ω /相である。従来は突極形ロータに電磁誘導原理で第 2 次空間高調波 (Fig. 2(a)) から起電力を得る誘導コイル (I-coil) と整流回路を介して界磁極を形成する界磁コイル (F-coil) の 2

種類のコイルを備えて、Fig. 3(a)のロータ巻線回路を構成していた。本論文では、Fig.1に示すように I-coil と F-coil に加えて、第3のロータ巻線として誘導共鳴コイル (IR-coil) を備えている。PWM インバータで不可避に発生するキャリア高調波は Fig. 2(b)に示すようにロータ突極に鎖交する。このキャリア周波数でLC直列共振するように Fig. 3(b)のロータ巻線回路を構成する。本モータは回転速度と電機子起磁力でロータ界磁電流が受動的に可変する可変界磁機能を有するため、各駆動点で d 軸および q 軸インダクタンスが大きく変動する。低回転域のトルク向上を目的としているため、低回転域のインダクタンスでインピーダンスマッチングを行うことで、Fig. 4に示すように低回転域ではキャリア高調波による強め界磁が可能となる。

3. 電磁界解析による性能予測

基礎検討としてキャリア周波数を 2 kHz とし、Fig. 3(b)の LC 直列共振回路を 2 kHz の共振周波数でインピーダンスマッチングさせた場合と、非共振の場合とで低回転域でのトルク特性等を比較した。電機子起磁力が 389 AT (電機子電流 $5A_{pk}$) 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 にトルクリプル比較、Fig. 7 に界磁電流波形を示す。両図より、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、トルクリプル (Fig. 6において従来モデルを T_{rc} 、提案モデルを T_{rp} で表記) の低減も確認できる。前述したとおり、本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ア高調波による強め界磁効果が低下している。また、Fig. 7に示すように提案モータは界磁電流が増加することで界磁量が増加し、突極パーミアンス変動が低減したことと界磁電流リプルも低減したことでトルクリプルを低減できた。Fig. 8に 100 r/min 時の IR-coil の電流波形を示す。同図より、誘導電流が共振周波数の 2 kHz であることが確認できる。

4. まとめ

本論文ではキャリア高調波を共振周波数とした LC 直列共振回路を付加した空間高調波自励式巻線界磁形同期モータを提案した。電磁界解析にてトルク向上効果を確認した。今後はキャリア周波数や共振回路のパラメータ (Q 値等) の最適化検討を行い、実機検証にて評価する予定である。

文 献

- (1) 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」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881(2015).
- (2) 野中:「ブラシ無し自励形単相同期発電機」, 電学論, Vol. 78, No. 842, pp. 407-412 (1958).
- (3) 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」, 電学論 D, Vol. 107, No. 10, pp. 1257-1264 (1987).
- (4) 深見・高・宮本・柴田:「三同期発電機の新しい自己励磁法」, 電学論 D, Vol. 114, No. 11, pp. 1083-1089 (1994).
- (5) 平本・中井・加納・水谷・山田:「ダイオード整流型磁石フリーモータの提案と原理検証」, 電学論 D, Vol. 136, No. 1, pp. 54-60 (2016).
- (6) 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」, 電学論 D, Vol. 136, No. 10, pp. 784-790 (2016).

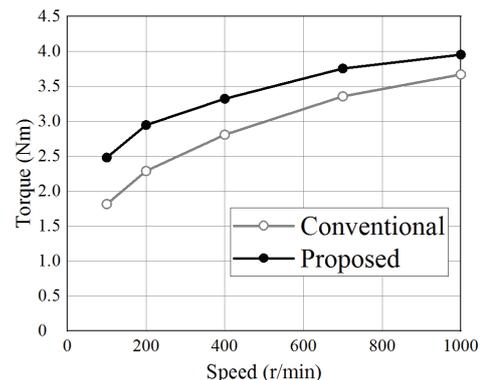


Fig. 5. Torque characteristics with respect to rotation speed under 389 AT.

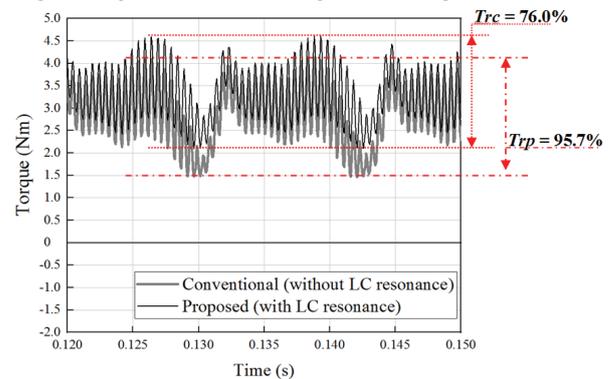


Fig. 6. Torque ripple under 389 AT at 400 r/min.

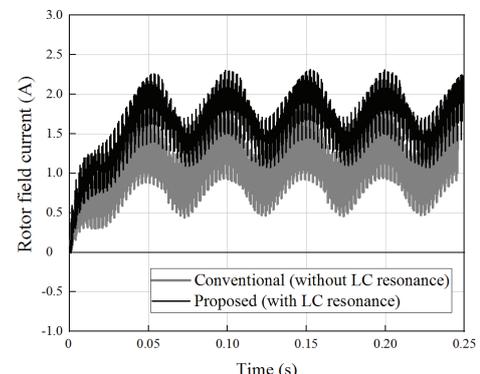
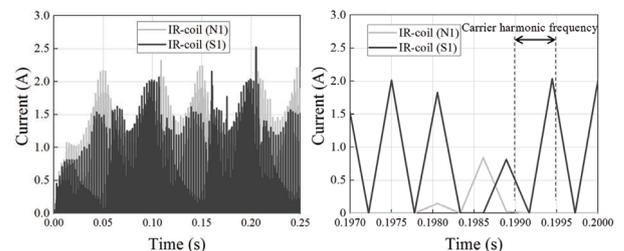


Fig. 7. Rotor field current under 389 AT at 400 r/min.



(a) Inductive resonance current. (b) Enlarged view of (a).

Fig. 8. Inductive resonance current under 389 AT at 100 r/min.