

新しいコンシクエントポール形モータの 零相回路を用いたトルクブーストに関する検討

村上和寛*, 野口季彦 (静岡大学), 服部晃尚, 金子陽一 (株式会社デンソー)

Investigation on Torque Boost Operation of Novel Consequent-Pole Motor Using Zero-Phase Circuit

Kazuhiro Murakami, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

Akihisa Hattori, Yoichi Kaneko (DENSO CORPORATION)

A new consequent-pole permanent magnet (PM) motor is proposed in the paper, which forms an image-pole-pairs for every pole-pair of N and S poles. It is possible for the motor to achieve field weakening operation with less d-axis current and high efficiency in a high-speed range. However, the motor still has a problem of low torque at low speeds. In order to solve this problem, a three-phase four-wire inverter is used to drive the motor composed of a set of three-phase windings and a zero-phase winding to boost the output torque in the low-speed range. The paper demonstrates computer simulation results and the torque boost operation of the motor is described.

キーワード: コンシクエントポールモータ, 弱め界磁制御, 零相回路, トルクブースト

(Keywords: consequent-pole permanent magnet (PM) motor, field weakening operation, zero-phase current, torque boost)

1. はじめに

近年, PM モータの可変速運転領域の拡大を目指した研究が精力的に行われている。PM モータの多くはエネルギー密度が高いネオジム磁石を使用して誘起電圧定数を高めることにより, 低速運転域で大きなトルクを発生するように設計できる。しかし, 低速運転域で大トルクを出力できる PM モータは高速運転が困難となる。そのため, 一般に弱め界磁制御を利用することで, PM モータの誘起電圧を減少させ高速運転域の拡大を行う。

筆者らは車載補機用小型モータで広範囲な可変速運転を可能とするため, 容易に実現できる弱め界磁制御による高速回転域の拡大を目指してきた。弱め界磁制御では巻線の銅損増加が懸念されるが, これを低減するため励磁電流を小さく抑える必要がある。そのため, インダクタンスを大きくできる新たなモータの磁気回路を検討しなければならない。

筆者らは高速運転域の拡大を PM モータの磁気回路からアプローチし, 低速運転域におけるトルクの増大を駆動方法から改善することを目指してきた。その一つとして, PM モータのロータで 1 極対毎にイメージポールを形成する構造とすることにより, 高速運転域の拡大を実現する新しいコンシクエントポールモータを検討してきた⁽¹⁾。

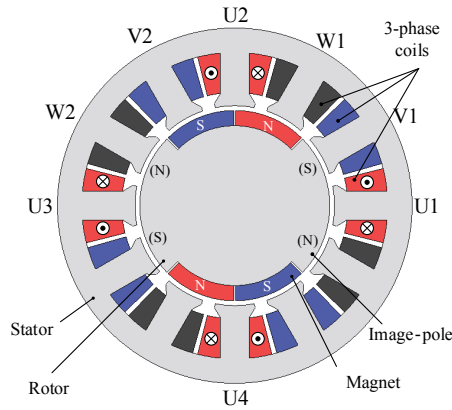
本稿では, 新しいコンシクエントポールモータの諸特性

について, 従来の SPM モータとコンシクエントポールモータとの比較評価を行った。また, 新しいコンシクエントポールモータの低速域におけるトルク出力特性を改善すべく, モータの磁気回路を変えることなく, 三相電流と零相電流を用いて低速運転域においてトルクをブーストする手法についても検討したので報告する。

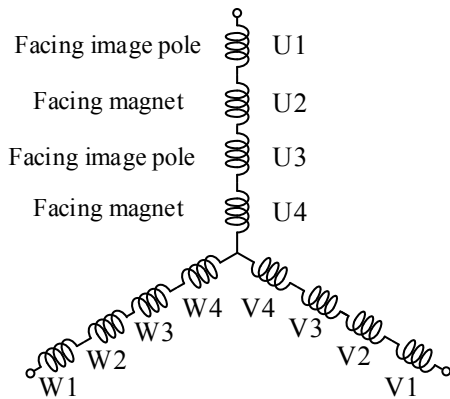
2. 提案するモータの構造と原理

Fig. 1 に提案するモータモデルを示す。このモータは 8 極相当 (磁石磁極: 4 極, イメージポール: 4 極) 12 スロット集中巻の基本構造をもつ。モータ体格の小型化のため, ステータ巻線は集中巻としている。ロータは N 極と S 極の 1 極対毎にイメージポールを形成する構造とし, 同じ相のイメージポールに対向する巻線と磁石に対向する巻線は直列接続とする。したがって, ロータコアの磁気回路は不平衡であるが, 各相のインダクタンスはバランスする。このため, 不平衡なロータ磁気回路によるモータ電流制御への悪影響はない。また, 各相のインダクタンスがバランスするので, イメージポール部の磁気回路設計に自由度が生まれる。

提案するモータは従来の PM モータに比べ磁石量を半分としているため磁石磁束が少なく, ロータの磁気回路は鉄が占める割合が多いので, インダクタンスが大きくなる構造をもつ。



(a) Proposed motor.



(a) Winding connection of proposed motor.

図1 提案モータモデル
Fig. 1. Proposed motor model.

よって、モータの誘起電圧は(1)式で表わされるので、

$$V_0 = \omega \sqrt{(\Psi_a + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (1)$$

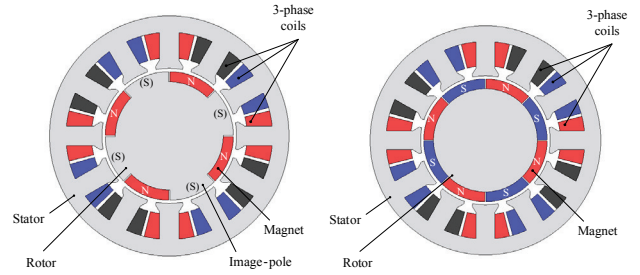
本モータは低速運転域ではトルクが小さくなるが、電機子のインダクタンスが大きく、磁石磁束が少ないことから弱め界磁制御時に少ない励磁電流で高速運転域の拡大を期待することができる。

3. 提案モータの諸特性

電磁界解析ソフト JMAG-Designer 18.0™ を用いて、提案するモータと一般的な SPM モータならびにコンシクエントポールモータの特性を比較する。提案するモータのモデルは Fig.1, コンシクエントポールモータと SPM モータのモデルを Fig. 2, モータモデルの詳細を Tab. 1 に示す。3 モデルのモータ体格は同等として、ロータ構造のみが異なっている。提案するモータとコンシクエントポールモータは 8 極相当（磁石磁極：4 極，イメージポール：4 極）であるが，SPM モータは 8 極全てを磁石とするため磁石体積は倍である。

〈3-1〉 無負荷誘起電圧の比較

3 モデルについてロータ回転速度が 600 r/min での U 相無



(a) Consequent pole motor. (b) SPM motor.

図2 比較モータモデル
Fig. 2. Comparison motor models.

表1 モータ仕様

Tab. 1. Motor specifications.

	Proposed motor	Consequent pole motor	SPM motor
Stator diameter	80 mm	←	←
Rotor diameter	42.85 mm	←	←
Stack length	37 mm	←	←
Air gap length	1.045 mm	←	←
Number of poles	8 (Image pole:4, magnet:4)	8 (Image pole:4, magnet:4)	8
Number of slots	12	←	←
Number of turns	16 T	←	←
Magnet volume	7.672 cc	7.672 cc	15.344 cc
Armature winding Connection	4 series Star connection	←	←
Magnet type	NMX-43SH	←	←

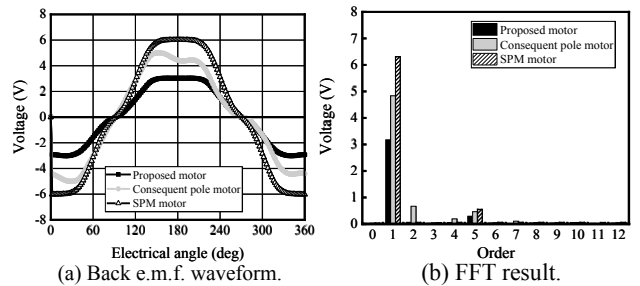


図3 無負荷誘起電圧波形と FFT 解析結果の比較
Fig. 3. Comparison of back e.m.f. and FFT analysis results.

負荷誘起電圧波形とその FFT 結果を Fig. 3 に示す。提案するモータと SPM モータでは磁石体積が 2 倍異なるので、提案するモータの誘起電圧定数は SPM モータの約 50% ほどである。このことから、提案するモータの方が広い高速運転領域をもつことが推察される。磁石体積が同等の本モータ

とコンシクエントポールモータを比較すると、本モータの方が誘起電圧定数は低い。また、周波数解析の結果より提案するモータは基本波含有率が高いことから弱め界磁制御による高速運転に適していると考えられる。

〈3・2〉 インダクタンスの比較

3モデルについて電機子電流振幅を 20 A 一定の条件で、電流位相 β を変化させたときの d 軸インダクタンス、q 軸インダクタンスの変化を Fig. 4 に示す。3モデルすべて電流位相 β を大きくするとインダクタンスが増加した。d 軸インダクタンス、q 軸インダクタンスが増加した要因として、電流位相を進角させるほど d 軸 q 軸ともに磁束量が減少するため磁気飽和が緩和されたことが挙げられる。

それぞれのモデルでインダクタンスを比較すると、d 軸インダクタンスは提案するモータが最大で SPM モータに対して 45%ほど大きい。q 軸インダクタンスはコンシクエントポールモータが最大である。SPM モータは d 軸インダクタンス、q 軸インダクタンスともに最小である。このように、イメージポールをもつモータは磁気回路に占める鉄の割合が高いため、インダクタンスが大きくなる。また、提案するモータは d 軸インダクタンスが最大であることから、弱め界磁制御時に少ない励磁電流で逆起電圧を減少させることができる。

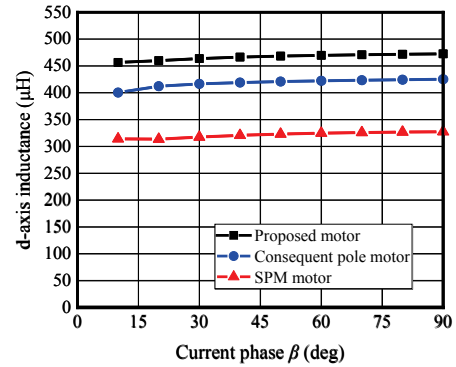
〈3・3〉 インダクタンスの高調波成分の比較

ロータ構造の違いによるインダクタンスの高調波成分について比較する。解析条件は磁石を空気とし、ロータ材料は鉄のみとする。通電条件は d 軸電流のみとし、電流振幅は 20 A とする。上記解析条件での 3モデルの U 相コイル鎖交磁束波形と FFT 結果を Fig. 5 に示す。SPM モータではロータ構造によるパーミアンス変動が生じないため、コイル鎖交磁束は基本波成分のみとなる。コンシクエントポールモータではロータ表面のイメージポールと磁石によりパーミアンス変動が生じる。その結果として、コイル鎖交磁束に偶数次成分が生じる。しかし、提案するモータではロータ表面にイメージポールと磁石が存在し、ロータ構造によるパーミアンス変動は生じるが、一つの U 相コイルはイメージポールに対向し、他方の U 相コイルは磁石に対向するため、パーミアンス変動の影響を受けない。したがって、提案するモータの U 相コイル鎖交磁束は偶数次成分が生じることなく基本波成分のみとなる。

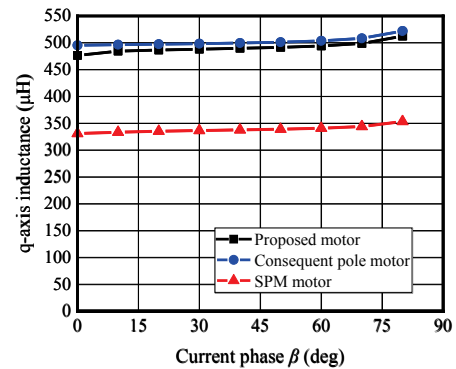
〈3・4〉 N-T 特性の比較

3モデルについて最大出力運転時の N-T 特性を Fig. 6 に示す。直流バス電圧を 12 V、最大電流振幅を 20 A、各相の最大起磁力は 1280 AT である。

3モデルの N-T 特性を比較すると、高負荷低速運転域では誘起電圧定数の高い SPM モータの出力トルクが最も大きくなる。しかし、高速運転域を最も広く取れるのは提案するモータであった。これは提案するモータの誘起電圧定数が小さいことと d 軸インダクタンスが大きいことから逆起電圧は小さく、逆起電圧を打ち消す誘起電圧が大きくなるからである。したがって、インバータの電圧飽和に達して弱



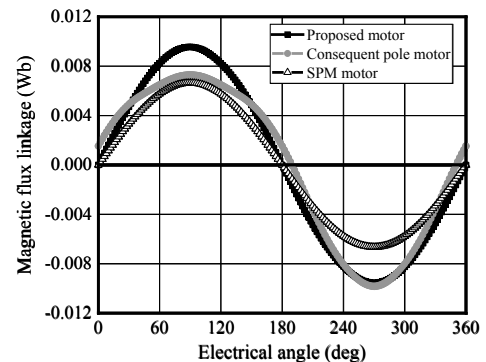
(a) d-axis inductance.



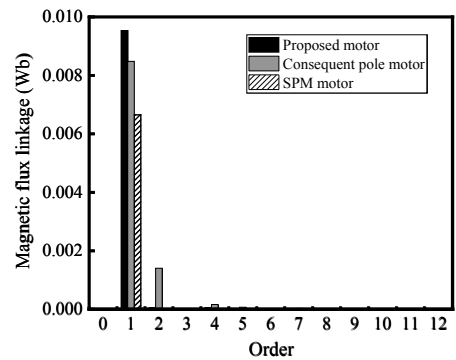
(b) q-axis inductance.

図4 インダクタンスの比較

Fig. 4. Comparison of inductance.



(a) U-phase flux linkage waveform.



(b) FFT result.

図5 U 相コイル鎖交磁束波形と FFT 解析結果の比較
Fig. 5. Comparison of U-phase flux linkage and FFT analysis results.

め界磁を行うと高速運転域が大幅に拡大される。コンシクエントポールモータが SPM モータと同程度の高速運転域しかもたないのは、ロータ構造によるインダクタンスの偶数次成分により、弱め界磁制御時の誘起電圧にも偶数次成分が生じ、弱め界磁制御による効果が得られにくいためである。

以上の結果より、同一のステータ起磁力とした 3 モデルの中で提案するモータは高速運転域を広くもつことから、弱め界磁制御時の励磁電流を最小に抑えられることがわかった。

4. 提案モータのトルクブーストの原理

以上より、PM モータのロータ構造を 1 極対毎にイメージポールを形成することで高速運転域を拡大できる。しかし、誘起電圧定数が小さいことから低速域での出力トルクは SPM モータの半分にすぎない。そこで、ロータの磁気回路を変更せずにステータ構造と駆動方法を工夫することでトルク特性の改善を検討した。

従来の PM モータの磁石起磁力は電機子の回転磁界と同期する成分により占められ、その他の高次成分は僅かである。しかし、提案するモータは N 極と S 極の 1 極対毎にイメージポールを形成するため、ロータの磁石起磁力が電機子の回転磁界と同期する 8 極成分だけでなく、低次磁石起磁力である 4 極成分ももつ。提案するモータが複数の磁石起磁力をもつのは、ロータ構造が二種類の磁石極性が重ね合わされたものと見なせるからである。提案するモータの磁石重畳の概念図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 において上段は 8 極成分を有する磁石配置、中段は 4 極成分を有する磁石配置である。極性の異なる磁石配置は互いに打ち消され、同一極性の磁石配置だけが残ることでこれら 2 つの起磁力成分が重畳したロータ磁石配置は最下段に示したようになる。磁石重畳の原理より、提案するモータは 2 つの起磁力成分を併せもつことがわかる。そこで、提案するモータの駆動方法として、低速運転域で三相と零相を用いることにより、1 台のインバータで 8 極成分と 4 極成分の磁石起磁力に同期させ、その結果として、低速運転域でのトルクをブーストする手法を検討する。Fig. 8 に提案するモータのステータ巻線構造を示す。提案するモータは同一ティースに三相巻線と零相巻線を設けた二重巻線構造をもつ。Fig. 9 に二重巻線構造をもつ提案モータの駆動回路を示す。本回路ではモータ中性点とインバータ直流バス間に電流経路を新たに設けることにより、三相平衡電流に加え零相電流を制御できる。よって、三相巻線による回転磁界は磁石起磁力の 8 極成分、零相巻線による交番磁界は 4 極成分と同期させることができる。以上のように、提案するモータを複合起磁力モータと捉え、三相のみから三相と零相で駆動することで、インバータの台数を増加させることなく低速運転域でのトルクブーストを実現することができる。

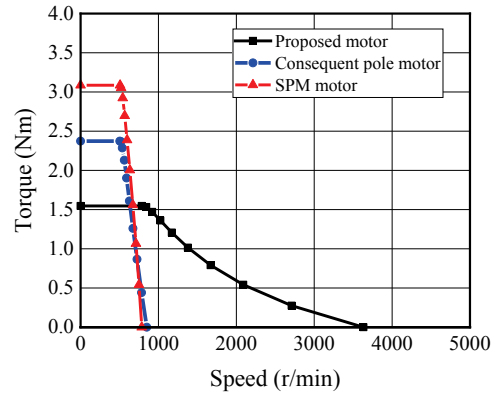


図 6 N-T 特性の比較
Fig. 6. Comparison of N-T Characteristics.

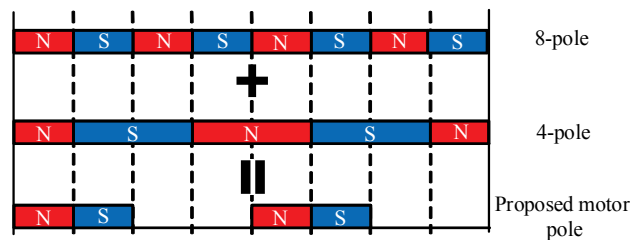


図 7 提案するモータの磁石重畳の概念図
Fig. 7. Illustration of proposed motor magnet arrangement.

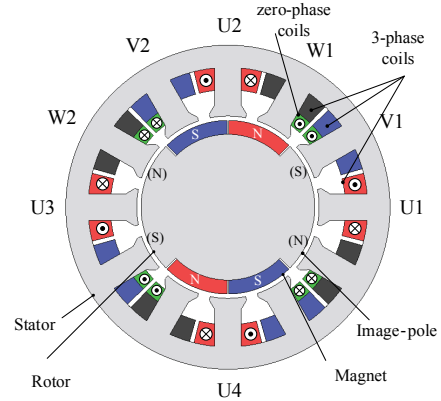


図 8 二重巻線構造をもつ提案モータ
Fig. 8. Proposed motor with double stator windings.

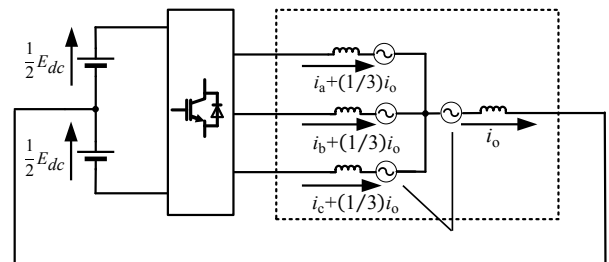


図 9 二重巻線構造をもつ提案モータの駆動回路
Fig. 9. Motor drive circuit using zero-phase winding.

表2 モータ仕様
Tab. 2. Motor specifications.

	Proposed motor with double stator windings
Stator diameter	80 mm
Rotor diameter	42.85 mm
Stack length	37 mm
Air gap length	1.045 mm
Number of poles	8 (Image pole:4, magnet:4)
Number of slots	12
Number of zero phase-turns	10 T
Number of three-phase turns	16 T
Magnet volume	7.672 cc
Three-phase winding connection	4 series
Zero-phase winding connection	4 series
Magnet type	NMX-43SH

5. シミュレーション結果

電磁界解析ソフト JMAG-Designer 18.0™を用いて、二重巻線をもつ提案モータの諸特性を確かめた。モータモデルは Fig. 8 に示した通りである。モータモデルの詳細を Tab. 2 に示す。

〈5-1〉 提案するモータの磁石起磁力

Fig. 10 に提案するモータのロータ表面磁束密度分布と FFT 解析結果を示す。ロータ構造を 8 極（磁石磁極：4 極，イメージポール：4 極）とすることで，磁石起磁力に 8 極成分と 4 極成分が含まれていることを確認できる。

〈5-2〉 二重巻線をもつ提案モータの無負荷誘起電圧

Fig. 11, Fig. 12 にロータ回転速度が 600 r/min での三相巻線，零相巻線における無負荷誘起電圧波形と FFT 結果を示す。三相巻線の中性点電位を基準電位としており，零相巻線はインバータ直流バスの中点を基準電位としている。三相巻線は 8 極成分と同期するため，無負荷誘起電圧波形で 8 次成分（40 Hz）をもつことが確認できる。零相巻線の無負荷誘起電圧波形は 4 極成分（20 Hz）を主成分とし，奇数次を含む方形波に近いことが確認できる。

〈5-3〉 トルクブーストの検証

三相と零相回路を用いた提案モータにて三相巻線による回転磁界は 8 極成分に同期させ，零相巻線による交番磁界は 4 極成分に同期させる。低速運転領域にてトルクブーストを行うため，電流指令値に対して電圧余裕をもつ運転領域を想定した。また，三相 4 線式の駆動回路を用いているため，零相巻線と三相巻線には独立した電流を通電させることができる。そのため，零相巻線には方形波電流を通電する。解析では電流源を用いて三相巻線各相に電流振幅が 1/3 の同相方形波電流を重畳し零相巻線に通電する。解析条

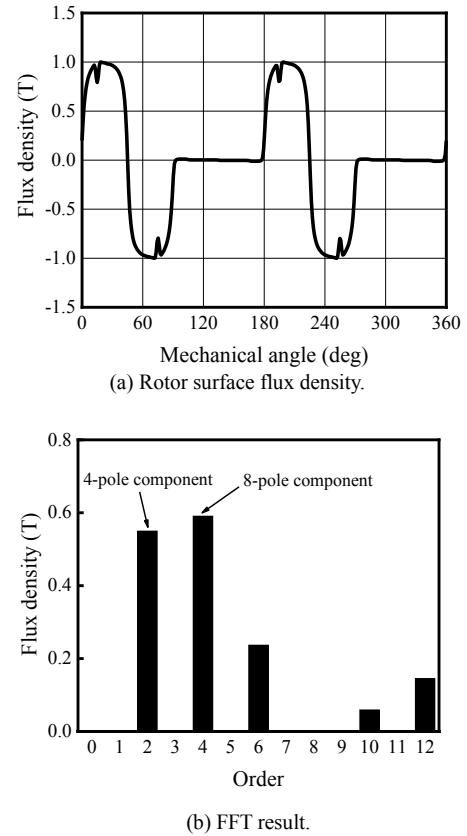


図 10 ロータ表面磁束密度分布と FFT 解析結果
Fig. 10. Rotor surface flux density and FFT analysis result.

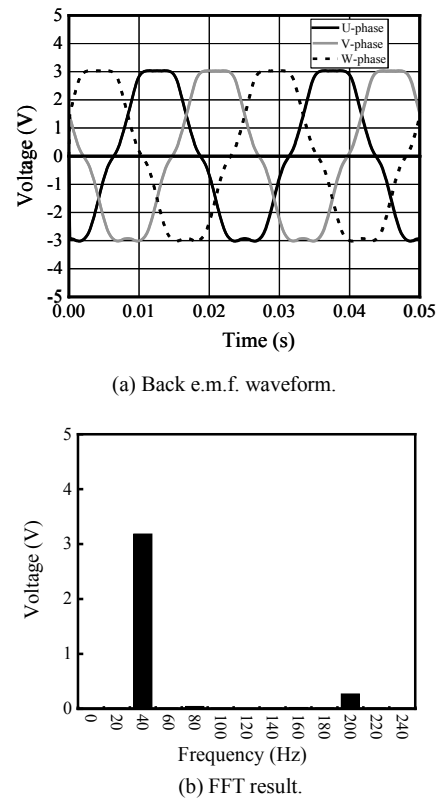


図 11 三相巻線の無負荷誘起電圧波形と FFT 解析結果
Fig. 11. Three-phase back e.m.f. waveforms and FFT analysis results of proposed motor with three-phase winding.

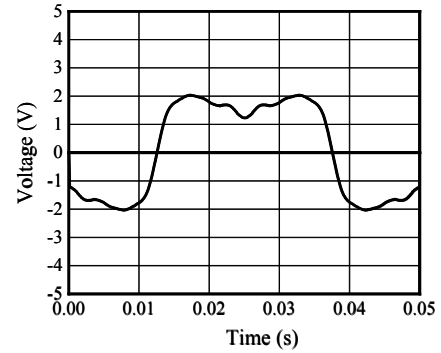
件として、三相巻線に流す電流は零相電流も含めた真の実効値で 20 A とし、零相巻線に流れる電流は実効値 20 A の方形波とした。Fig. 13 に三相+零相回路と三相回路のみで提案モータを駆動した場合のトルク波形と FFT 解析結果を示す。零相は単相駆動であるためトルクリプルが大きいが三相と零相で駆動することにより平均トルクが増加することを確認できた。

6. まとめ

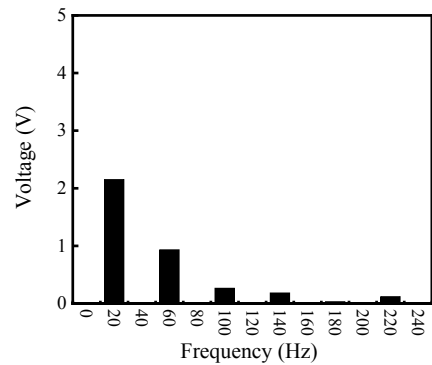
本稿では、N 極と S 極の 1 極対毎にイメージポールを形成する新しいコンシクエントポールモータの諸特性について、SPM モータと従来のコンシクエントポールモータとで比較評価し、新しいコンシクエントポールモータは同等体格で広い高速運転域をもつことを示した。しかし、新しいコンシクエントポールモータは低速運転域において出力トルクが小さいことが問題である。そこで、N 極と S 極の 1 極対毎にイメージポールを形成するロータ構造は不変とし本来の磁気回路特性は有したままステータ構造を変えて三相と零相回路を用いて駆動することにより、平均トルクを増加できることを確認した。今後は、零相巻線に生じる誘起電圧が高速運転域における出力特性の拡大に影響するので、回路動作にて零相巻線に生じる誘起電圧を抑制する手法について検討する。また、ステータ二重巻線構造ではスロット内での零相巻線と三相巻線の干渉により、電機子起磁力を十分に確保できないので、零相巻線と三相巻線のスロットが独立するステータ構造を検討する。

文 献

- (1) 村上・野口・青山:「新規コンシクエントポールモータの提案と数学モデルの基礎検討」H30 電学東海大 (2018)
- (2) 土方・茂田・刈谷・赤津・加藤:「二巻線方式を用いた複合起磁力モータに関する検討」電学論 D, Vol. 133, No. 10, pp. 986-994 (2013)
- (3) 赤津・涌井:「巻線係数とインダクタンス係数を用いた多極多スロット集中巻 SPMSM の簡易設計手法」電学論 D, Vol. 127, No. 11, pp. 1171-1179(2007)
- (4) J.A. Tapia, F. Leonardi, and T.A. Lipo: "Consequent-pole Permanent Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability", IEEE Trans. on IA., Vol. 39, No. 39, pp. 1704-1709 (2003)
- (5) T.A. Lipo and M. Aydin: "Field Weakening of Permanent Magnet Machines - Design Approaches", Power Electronics and Motion Control Conference, Riga, Latvia (2004)
- (6) S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasa, K. Taniguchi: "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control Considering Inverter Capacity", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-26, No. 5, pp. 866-871, (1990)
- (7) 森本・畠中・童・武田・平紗:「PM モータの弱め磁束制御を用いた広範囲可変速運転」電学論 D, Vol. 112, No. 3, pp. 292-298, (1992)
- (8) J. A. Tapia, F. Leonardi, T. Lipo: "Consequent-Pole Permanent Magnet Machine with Field Weakening Capability", Proc. of IEMDC 2001, pp. 126-131, (2001)
- (9) 宮本・Katteden Kamiev・小林・横井・樋口:「コンシクエントポール型 PM の設計法に関する一考察」電気学会研究会資料, 回転機研究会, RM-18-112, pp. 35-38 (2018)
- (10) T. Ogawa, T. Takahashi, M. Takemoto, S. Ogasawara, H. Arita, and A. Daikoku: "Increasing the Operating Speed of a Consequent Pole Axial Gap Motor for Higher Output Power Density," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 8, No. 3, pp. 497-504, (2019)

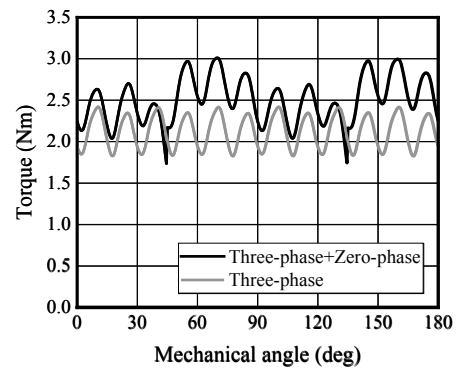


(a) Back e.m.f. waveform.

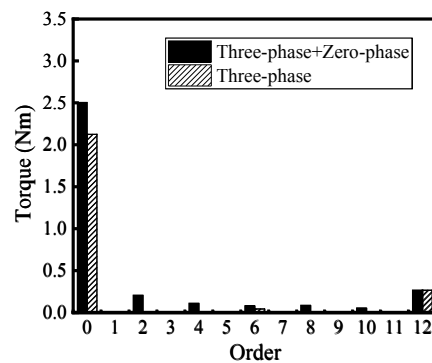


(b) FFT result.

図 12 零相巻線の無負荷誘起電圧波形と FFT 解析結果
Fig. 12. Zero-phase back e.m.f. waveform and FFT analysis result of proposed motor with zero-phase winding.



(a) Torque waveforms.



(b) FFT results.

図 13 三相+零相駆動と三相駆動でのトルク波形と FFT 解析結果
Fig. 13. Torque waveforms and FFT analysis results between three-phase and three-phase plus zero-phase.