

# 空間高調波で自励する巻線界磁形同期モータの補極による電磁石トルク向上の数理解析

青山 真大\* (静岡大学, スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Mathematical Analysis of Electromagnet Torque Improvement of Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics with Auxiliary Poles

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

## 1. はじめに

HEV 用トラクションモータとして永久磁石を使用しない自励式巻線界磁形同期モータが検討されている<sup>(1)</sup>。本モータは、従来の自励式巻線界磁形同期モータに対して逆相分磁界を発生させるための補助電機子巻線が不要であり、一般的な他励式巻線界磁形同期モータに対して、界磁用チョッパ回路が不要であるという利点をもっている<sup>(2)(3)</sup>。筆者らは既にロータ突極間に補極を設けることで自励に必要な誘導電流を効率的に発生させ、永久磁石同期モータに比肩する出力とトルク密度を達成するモータを提案した<sup>(1)</sup>。しかし、今までは電磁界シミュレーションによる解析的な検証のみであり、数理的な説明がなされていなかった。本稿では、既提案の数学モデルに基づき補極による電磁石トルク向上の説明を行い、補極の有無による電流位相-トルク特性ならびに可変速特性の比較を行ったので報告する。

## 2. 自励式巻線界磁形同期モータの概要

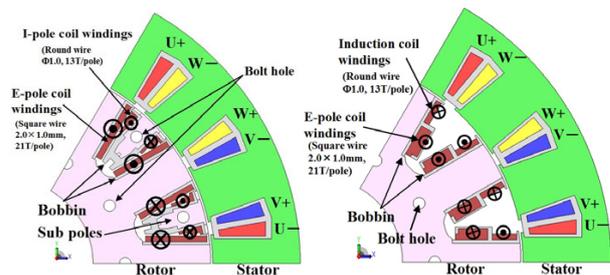
図 1 にモータ主要諸元を共通で設計し、突極間 ( $q$  軸) に空間高調波が鎖交することで誘導電流を生ずる極 (I-pole) を配置した提案モータと、I-pole を電磁石極 (E-pole) と同じ突極 ( $d$  軸) に配置した補極を有さないモータを示す。図 2 にロータ巻線の結線を示し、図 3 に提案モータの構造を示す。 $q$  軸上に磁的に遮蔽された I-pole は、同図に示すように支持リングでアキシャル方向から保持する機構を想定している。

## 3. 補極に関する数理解析

(1)に提案するモータの出力トルク式を示す<sup>(1)</sup>。

$$T = P_p (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + P_p \frac{\omega K_E}{N_s} \left( K_{d-axis} i_{sd} + K_{q-axis} i_{sq} \right) \left\{ \begin{array}{l} -K_{Lq} L_q \left( 2N_{rd} + \frac{N_{rq}}{\pi} \right) i_{sd} \\ + K_{Ld} L_d \left( N_{rd} + \frac{2N_{rq}}{\pi} \right) i_{sq} \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで  $P_p$  は極対数,  $L_d$ ,  $L_q$  は  $d$  軸および  $q$  軸インダクタンス,  $N_{rd}$ ,  $N_{rq}$  は各軸のロータ巻線ターン数,  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  は各軸の



(a) With auxiliary poles (proposed). (b) Without auxiliary poles.

図 1 自励式巻線界磁形同期モータの断面図

Fig. 1. Cross section diagrams of self-excited wound-field synchronous motors.

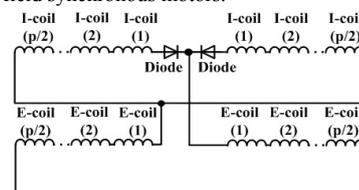


図 2 ロータ巻線の結線

Fig. 2. Rotor winding connection diagram using full-bridge rectifier.

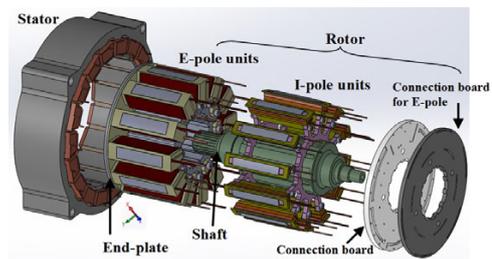


図 3 提案モータの構造

Fig. 3. Mechanical configuration of proposed motor.

電機子電流,  $K_{Ld}$ ,  $K_{Lq}$  は各軸の漏れインダクタンス係数であり, 係数  $K_E$  は(2)で示される。 $R_{rd}$ ,  $R_{rq}$  は各軸のロータ巻線抵抗である。 $K_{d-axis}$ ,  $K_{q-axis}$  は I-pole に鎖交する各軸における空間高調波磁束の軸間干渉補正係数である。

$$K_E = \frac{9}{2\pi} \frac{K_S L_S}{R_{rd} + R_{rq}} \frac{N_{rq}}{N_s} \quad (2)$$

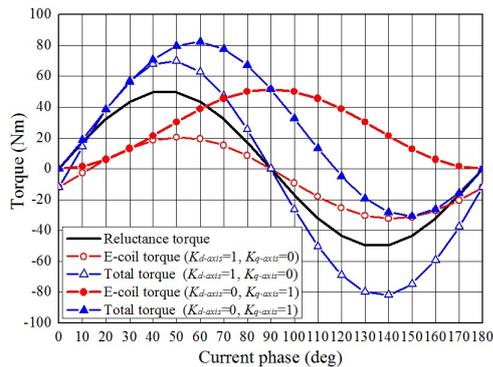
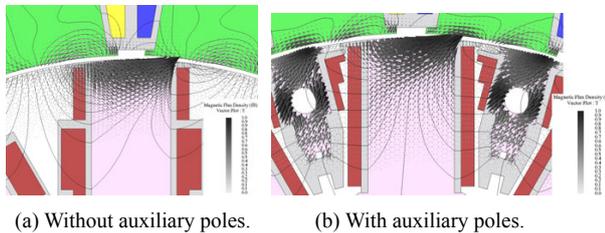


図 4 数学モデルによる電流位相-トルク特性

Fig. 4. Current phase-torque characteristics calculated by mathematical model (average torque in steady state).



(a) Without auxiliary poles. (b) With auxiliary poles.

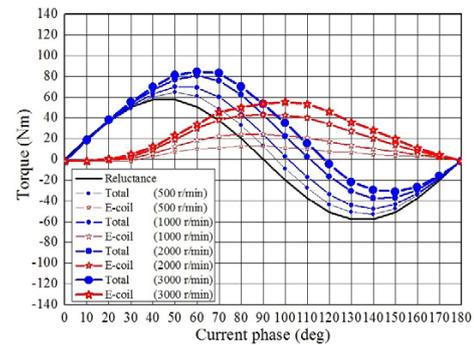
図 5 第 3 次空間高調波磁束線及びベクトル分布

Fig. 5. Magnetic flux lines and vectors of third space harmonics.

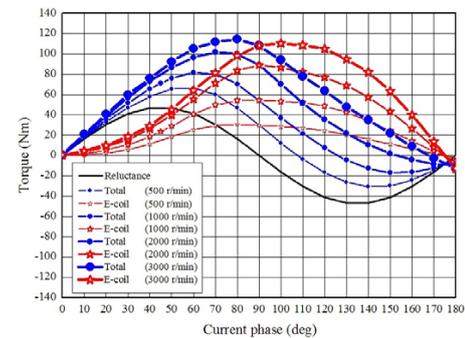
(1)で  $d$  軸と  $q$  軸の第 3 次空間高調波が I-pole に軸間干渉せずに鎖交すると近似した場合、 $K_{d-axis}=1, K_{q-axis}=0$  は補極なしの場合を、 $K_{d-axis}=0, K_{q-axis}=1$  は補極ありの場合に対応する。これら 2 通りにおいて数学モデルを用いて電流位相-トルク特性を計算した結果を図 4 に示す。同図より補極を設けることで電磁石トルクを大幅に向上できることがわかる。すなわち、 $q$  軸の空間高調波磁束が主な界磁エネルギー源となっていることが確認でき、自励のための励磁電流であると言える。

#### 4. 電磁界解析による評価

図 5 に電磁界解析により得られた第 3 次空間高調波の磁束線図と磁束ベクトル図を示す。ここで、本モータは集中巻構造であり起磁力分布が台形波状となる第 3 次空間高調波が重畳したモータであることに注意されたい<sup>(1)</sup>。同図より、突極部では電磁石極も有していることから磁極幅を広く設計する必要もあり、第 3 次空間高調波が短絡磁路を形成して誘導電流を効率的に発生させることができない。一方、補極を設けることで  $q$  軸の空間高調波磁束が直交して誘導電流を効率的に発生させることができる。図 6 に電磁界解析により求めた最大負荷 (273 A<sub>pk</sub>, 60 s) での可変速特性を示す。補極を設けた場合、ロータとステータの位置関係によっては補極が磁的に主磁路から遮蔽されていても両隣のティースにバイパス磁路が形成される場合があり、突極



(a) Without auxiliary poles.



(b) With auxiliary poles.

図 6 数学モデルによる電流位相-トルク特性

Fig. 6. Current phase-torque characteristics calculated by mathematical model (average torque in steady state).

比が低下することでリラクタンストルクは低下する。しかし、可変速特性としては角速度  $\omega$  に対して不変であるリラクタンスとは別に電磁石トルクが  $\omega$  の関数であるため、電磁石トルクが  $\omega$  とともに増加する。そのため、補極を設けて電磁石トルクの比率を増加させることで、可変速時の総合トルクを大幅に向上させることができる。

#### 5. まとめ

本稿では、補極を設けることで電磁石トルクと可変速特性の向上が可能であることを数学モデルと電磁界解析により説明した。今後は、モータパラメータを最適化することで更なる高トルク密度設計に取り組む所存である。

#### 文 献

- (1) 青山・野口:「空間高調波で自励する巻線界磁形同期モータの改良数学モデル」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, SPC-14-007/MD-14-007 (2014)
- (2) 野中:「自励単相同期電動機」, 電気学会雑誌, No.842 Vol.78 (1958)
- (3) 桑原・小坂・鎌田・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, VT-13-023 (2013)