

# 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

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 Rare-Earth Free Motor with Field Pole Excited by Space Harmonics

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

## 1. はじめに

HEV, EV などのシステムに組み込まれる主電動機や発電機はシステム効率向上のため, 広い可変速範囲と小型, 高効率であることが望まれる。さらに小型, 高エネルギー密度化, 市街地走行時の低負荷領域における駆動効率を高めるため, 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に用いられている。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一方, 今後の HEV, EV 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, 近年さまざまな省レアアースや脱レアアースモータが提案されている。脱レアアースモータとしては, アキシナル形 SRM<sup>(1)</sup>や板厚 0.1mm の電磁鋼板を用いた SRM<sup>(2)</sup>などが発表されているが, いずれも IPM とは異なり, 固定子側から励磁エネルギーも供給する必要があるため, 車載用で特に効率が重視される低負荷領域の効率低下を免れない。さらに 0.1mm 材の電磁鋼板はコスト的に不利である上, 金型で打ち抜く生産面でも問題がある。本稿では, 上記のような問題に鑑み, 0.35mm の一般的な電磁鋼板 (35A230) を用いた集中巻リラクタンスモータについて, 過去に検討された自己励磁技術<sup>(3)</sup>を応用し, 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己励磁可能な電磁石を用いることでトルク向上を図ることができるレアアースフリーモータの基礎検討を行ったので報告する。

## 2. ベンチマークモータ (集中巻 Syn-RM)

図 1 と表 1 に示す集中巻 Syn-RM をベンチマークとして設計する。このベンチマークモータを基準に, 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回収し, トルクを発生させるモータについて検討する。

## 3. 初期モデル

**〈3・1〉 動作原理** 図 1 のロータティースに空間高調波により誘導電流を発生させる巻線 (以下, 誘導極) とダイオードを介して整流した電流により電磁石を形成するための巻線 (以下, 電磁石極) を備えた構造を考える。図 2 に

表 1 Syn-RM の諸元

Table 1. Specifications of Syn-RM.	
Number of poles	12
Number of slots	18
Axial length of core	54 mm
Air gap	0.7mm
Maximum current, $\beta$	273Apk, 45deg
Winding resistance	32.1m /phase
Number of coil-turn	48
Winding pattern	6 parallel

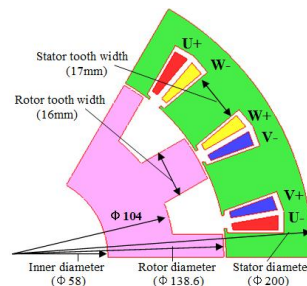


図 1 Syn-RM の断面図

Fig.1. Cross section diagram of Syn-RM.

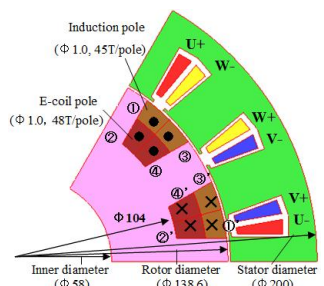


図 2 初期モデルの断面図

Fig.2. Cross section diagram of prototype.

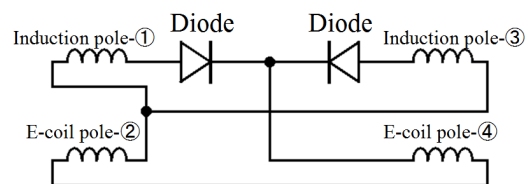


図 3 ロータ巻線結線図

Fig.3. Rotor winding connection diagram.

初期モデルの断面図を示し, 図 3 にロータ巻線の結線図を示す。図 3 のように巻線を結線することで, 誘導極コイルに鎖交する空間高調波によって発生した誘導電流により自己励磁可能な電磁石を形成することができる。

**〈3・2〉 初期モデルの FEA 結果** 図 4 に電磁石極コイルに流れる界磁電流を示し, 図 5 にトルク特性を示す。これらの結果から空間高調波を界磁エネルギー源として利用できており, 磁束密度が高まることで定常時の平均トルクが

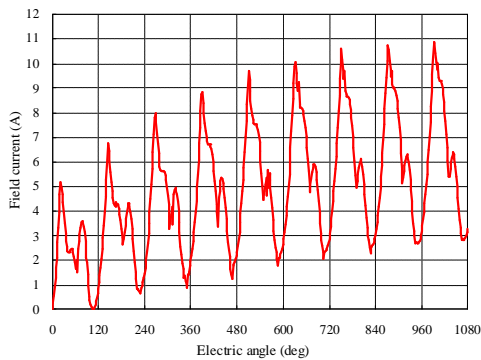


図 4 電磁石極の界磁電流特性

Fig.4. Field current of E-coil pole.

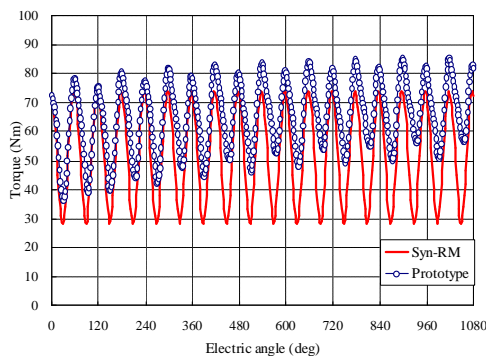


図 5 トルク特性

Fig.5. Torque characteristics.

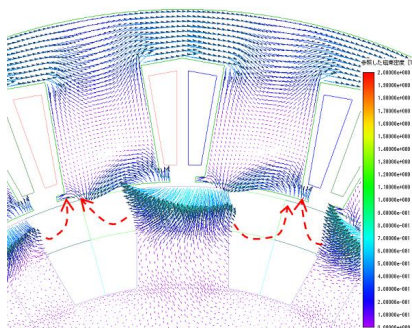


図 6 第 3 次空間高調波の磁束ベクトル

Fig.6. Magnetic flux vector of 3<sup>rd</sup> space harmonics.

約 31.8%増加していることが確認できる。

〈3・3〉初期モデルの空間高調波分布 図 4 より電気角 1 周期あたり 3 倍調波の界磁電流が発生しているため、第 3 次空間高調波が主要な界磁エネルギー源であることがわかる。図 6 に第 3 次空間高調波の磁束ベクトルを示す。解析ソフトの都合上、鉄損解析対象以外の材料領域には磁束ベクトルが描写されていないが点線矢印で示した軌跡で第 3 次空間高調波の磁路が形成されていることを推測できる。よって、改良モデルではロータティース間に誘導極を配置することで効率的に誘導電流を発生させ、トルク向上を図ることとした。なお、駆動条件やコアサイズ等は共通として検討する。

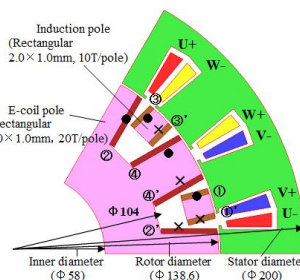
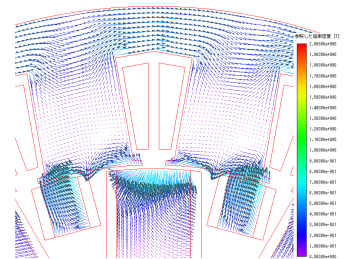
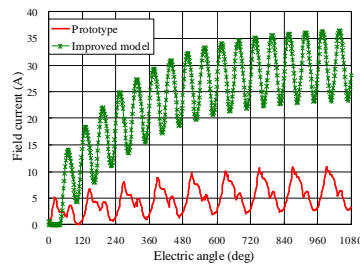
図 7 改良モデルの断面図  
Fig.7. Cross section diagram  
of improved model.図 8 第 3 次空間高調波分布  
Fig.8. Magnetic flux vector of  
3<sup>rd</sup> space harmonics.

図 9 界磁電流特性

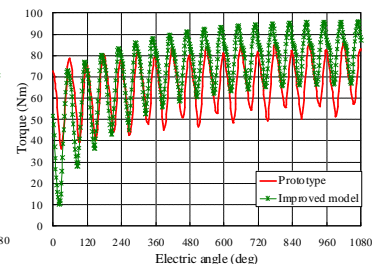
Fig.9. Field current of  
E-coil pole.

図 10 トルク特性

Fig.10. Torque characteristics.

#### 4. 改良モデル

図 7 に改良モデルの断面図を示す。突極比が下がり、トルク低下となることを防ぐため、誘導極と電磁石極は磁氣的に遮断している。誘導極は端板等でアキシャル方向から保持する機構を想定している。図 8 に第 3 次空間高調波の磁束ベクトルを示し、図 9 に界磁電流特性、図 10 にトルク特性を示す。図 8 より第 3 次空間高調波が有効に誘導極コイルに鎖交していることがわかる。その結果、図 9、10 に示すように界磁電流が初期モデルよりも増加し、初期モデルに対して定常時の平均トルクが約 19.5%増加していることがわかる。

#### 4. まとめ

本稿では、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回収することで集中巻リラクタンスモータのトルクを向上することが可能であることを確認した。

今後は、同一体積で IPM モータに比肩するトルクを出力できるように電磁界解析による詳細な磁気回路設計を行っていく。

#### 文 献

- (1) 在原・赤津：「アキシャル型 SRM の鉄損測定および損失低減方法の提案」, 電気学会産業応用, 3-85 (2011)
- (2) 竹野・星野・千葉・竹本・小笠原：「HEV 用 50kW SRM の高出力型と高効率型の実験的特性比較」, 電気学会産業応用, vol.III, pp.407-412 (2011)
- (3) 野中：「自励形単同期電動機」, 電気学会雑誌, No.842, Vol.78 (1958)