

# 空間高調波を利用した補極付ラジアル エアギャップ形磁石フリーモータの 実機基礎検証

青山 真大 (静岡大学/スズキ) , 鄧 家寧\* (スズキ) , 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Experimental Verification of Radial-Air-Gap Type Rare-Earth-Free Synchronous Motor

Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles

Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation), Kanei Tou (SUZUKI Motor Corporation),

Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年、車両のハイブリッドシステムとして 48V のローエンドなものから数百 V の二次電池を用いて電動化率を高めた高効率パワートレイン技術まで、様々なポートフォリオが検討されている。それらの主機モータには専ら埋込み磁石形同期モータ (IPMSM) が用いられているが、永久磁石のコスト割合は依然として高い。磁石フリーモータの可能性として、集中巻ステータにおいてロータ損失増加の主要因の一つである第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源に活用した自励式巻線界磁モータが提案されている<sup>(1)(2)</sup>。この種のモータは相互インダクタンスを介した電磁誘導現象を利用して界磁をつくるとともにトルクを出力するため、ステータとロータ間の結合係数を如何に向上させるかが重要である。そのため、筆者らは図 1(a)のモデルに対して、突極間に補極を配置した図 1(b)のモデルを提案してきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。本稿では、提案モータの自己励磁動作を検証するために原理検証用モータの試作を行い、基礎的な運転特性を実測したので報告する。

## 2. 試作機の概要

図 2(a)に示すように提案するモータは三相 18 スロットを有する集中巻ステータと、12 極の突極を有するロータ構造を採用している。鉄心は新日鐵住金製 30DH を用いており、ロータコイルは補極に巻かれた誘導コイル (I-coil) とロータ突極に巻かれた界磁コイル (E-coil) とともに  $\phi 0.8$  の AIW 丸線を採用している。補極は Y 字形の積層電磁鋼板で突極部分に対してクサビ形状に取り付けられている。誘導コイルは 53 T、界磁コイルは 122 T 巻かれており、図 2(b)のように成形とレーシング処理したのち、ワニス含浸している。ロータ巻線は図 2(c)に示すようにロータコイルエンド部保護とダイオード固定の役割する樹脂 (PPS) 製カバー内にカソードコモン SiC ダイオード ( $V_R = 650 \text{ V}$ ,  $I_F = 15 \text{ A/leg}$ ) を内包し、一極対ごとに全波整流回路を構成している。真

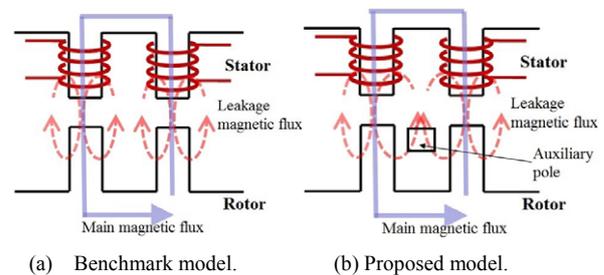
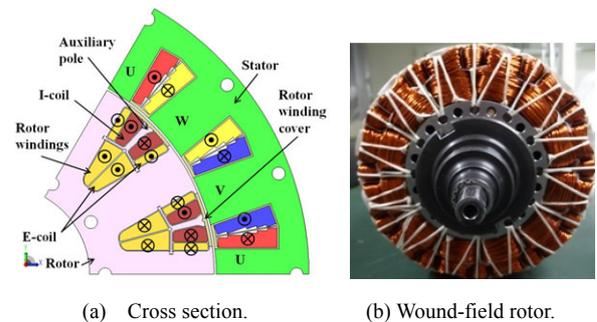


図 1 主磁束と漏れ磁束の磁路

Fig. 1. Main magnetic flux path and leakage magnetic flux path.



(a) Cross section.

(b) Wound-field rotor.



(c) Full-bridge rectifier.



(d) Auxiliary poles.

図 2 提案モータの構造と試作機

Fig. 2. Mechanical configuration of proposed motor and prototype machine.

鋸製の端板はバランス修正用途に加えてダイオード放熱の役割を担っている。ステータは AIW 平角線  $0.8 \times 3.0$  を用いており、30 T/pole でフラットワイズ巻きされている。

### 3. 実機による基礎運転特性の検証

#### 3-1. ロータ電流特性

ロータ電流を測定するため、スリップリングを用いて一極対分のダイオード順方向と逆方向誘導電流の測定を行った。図 3 にキャリア周波数 10 kHz、120 r/min、一極分の電機子励磁起磁力  $100 A_{rms}T$  の条件で測定したロータ電流波形を示す。同図より電気的基本波周波数が 12 Hz なので第 3 次時間高調波は 36 Hz になり、それが順方向と逆方向で交互に観測される。即ち、ステータ側から励磁することで発生する第 2 次空間高調波（回転座標上で第 3 次時間高調波）がロータ巻線に鎖交し、その誘起電圧によりロータ電流が流れることが確認できる。この誘導電流が整流されることでロータに自励された電磁石磁極が形成される。

#### 3-2. 可変速トルク特性

リラクタンストルクと電磁石トルクの分離を行うためにロータ巻線を開放した状態でリラクタンストルクの測定を行った。次に、図 2 に示すようにロータ上で整流回路結線した状態でトルク測定を行った。図 4 にステータ励磁条件を変化させて最大トルクとなる電流位相でトルクを比較した結果を示す。同図より、回転速度の増加とともに電機子起磁力に対するトルクの増加を確認できる。即ち、回転速度の増加に伴いロータの励磁電流が増加することでロータ磁化量が増加していることがわかる。一方で低速度域のトルク不足が課題となる。特にアプリケーションとして車載を想定した場合、低速度域でのトルク不足は加速性能の低下や坂道発進時のトルク不足となる。今後、パルス電流によるトルク向上の検討や空間高調波以外を界磁エネルギー源に利用することでトルク密度向上の検討を進める<sup>(4)(5)</sup>。

#### 4. まとめ

本稿では、突極間に補極を配置して自励式電磁石トルクの向上を狙った提案モデルの実機基礎検証を行った。ロータ電流測定の結果、空間高調波によって自励する基本動作を確認ができた。今後は、補極の有無によるトルク特性の比較、詳細な損失分析や効率測定を行う予定である。さらに実機基礎検証を通して、低回転、低トルク域におけるトルクリプルが問題となった。ロータ磁化量が低く、磁束密度が低いためステータとロータの二重突極構造に起因した大きな磁気抵抗の脈動によるトルクリプルが原因であると考えられる。車載した場合、ジャダー発生原因となるため対策が必要となる。今後、モータ制御によるトルクリプル低減法の検討を進めるとともに空間高調波以外からも界磁エネルギー源を得ることができる方法の検討を進める。

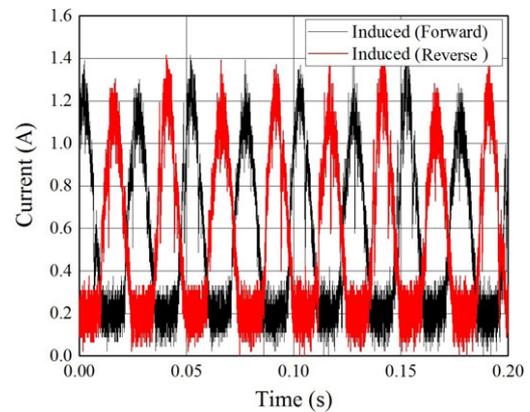


図 3 ロータ電流波形

Fig. 3. Rotor current waveforms.

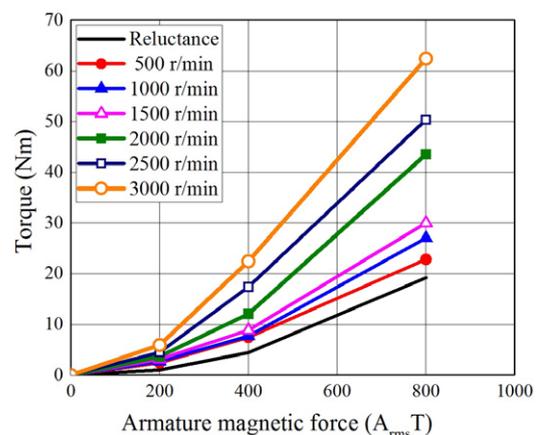


図 4 可変速トルク特性

Fig. 4. Adjustable speed drive characteristics.

#### 文 献

- (1) K. Hiramoto, H. Nakai: "Proposal and Feasibility Study of The Integrated Diode Synchronous Motor", *IEEJ Annual Meeting*, No.5-054, pp.97-98 (2014)
- (2) M. Aoyama, T. Noguchi: "Preliminary Study on Rare-Earth Free Motor with Field Pole Excited by Space Harmonics", *IEEJ Annual Meeting*, No.5-051, pp.91-92 (2013)
- (3) M. Aoyama, T. Noguchi: "Torque Performance Improvement with Modified Rotor Winding Circuit of Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics", *IEEJ Trans. IA*, Vol.134, No.12, pp.1038-1049 (2014)
- (4) E. Yamada, W. Ang, M. Okamura, R. Mizutani, K. Hiramoto, H. Suzuki, H. Nakai: "Restraint on Peak Value of Pulsation Current in the Integrated Diode Synchronous Motor", *IEEJ IA Conference*, 3-25 (2014)
- (5) M. Aoyama, T. Noguchi: "Preliminary Study on Active Magnetization Control of Rare-Earth Free Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics", *IEEJ Technical Meeting*, MD-13-35, RM-13-44 (2013)