

パンケーキキアキシャルギャップ形 誘導電動機の提案と実機自己始動特性検証

青山 真大* (静岡大学), 津谷 宏紀, 平田 彰太郎, Lars Sjöberg (ヘガネス)

Proposal and Experimental Verification of Self-Starting Characteristics of Pancake Axial-Gap Type Induction Motor
Masahiro Aoyama* (Shizuoka University), Hiroki Tsuya, Syotaro Hirata, Lars Sjöberg (Höganäs)

1. はじめに

従来から誘導電動機 (IM) は産業用汎用モータや家電民生用モータとして広く用いられてきた。IM は堅牢性が高く、永久磁石も不要なためコスト面での優位性も高い。特に産業用汎用モータの場合、商用交流電源からの自己始動駆動も可能なため、システムの低コスト化が可能である。また、近年は Tesla Motors に代表されるように電動車駆動用モータとしても採用されている^{(1),(2)}。IM は一次側から励磁磁束とトルク磁束を供給するため、一種の可変界磁モータとして分類することで、広い可変速特性に実現と高回転域が常用の場合については永久磁石式同期電動機 (PMSM) よりもシステム効率の向上を達成できる。しかし、IM は界磁磁束を得るための励磁電流が必要であり更なる高効率化が困難であった。さらに三相 IM の場合は分布巻ステータ構造のため、電機子銅損の低減が困難といった問題がある。

上記の課題に鑑みて、著者らは電機子銅損の低減且つ小型化が可能なトロイダル巻ステータ構造で、さらにラジアルギャップ構造よりも高性能・高効率を達成できるパンケーキ構造のアキシャルギャップモータの開発に取り組んでいる。本稿では提案モータの磁気回路の説明と実機による無負荷時自己始動特性の評価結果を報告する。

2. 提案する新しいアキシャルギャップ形誘導機

Fig. 1(a), (b)に提案するモータの構造を示す。三次元磁路を形成するためにロータコアとステータコアは Höganäs 社製の圧粉鉄心 (SMC) を用いている。シングルステータ+ダブルロータ構造とすることでトルク発生面を拡大し、高トルク密度化を狙っている。2つのロータは機械的に連結されて同じ速度で回転する。電機子巻線は Fig. 1 (c)に示すようにトロイダル巻したコイルを毎極毎相スロット数 $q = 2$ で分布巻と同じ起磁力波形になるように結線している。Fig. 1 (d), (e)にそれぞれ磁束密度ベクトル分布と二次導体内の渦電流ベクトル分布の例を示す。同図に示すように各相巻線で発生した電機子磁束ベクトルがステータバックヨーク内で対向し、アキシャルギャップ両面に流れてエアギャップを介して両ロータに鎖交したのちにステータに鎖交する並列磁気回路が構成されている。このとき、Fig. 1 (a)のディ

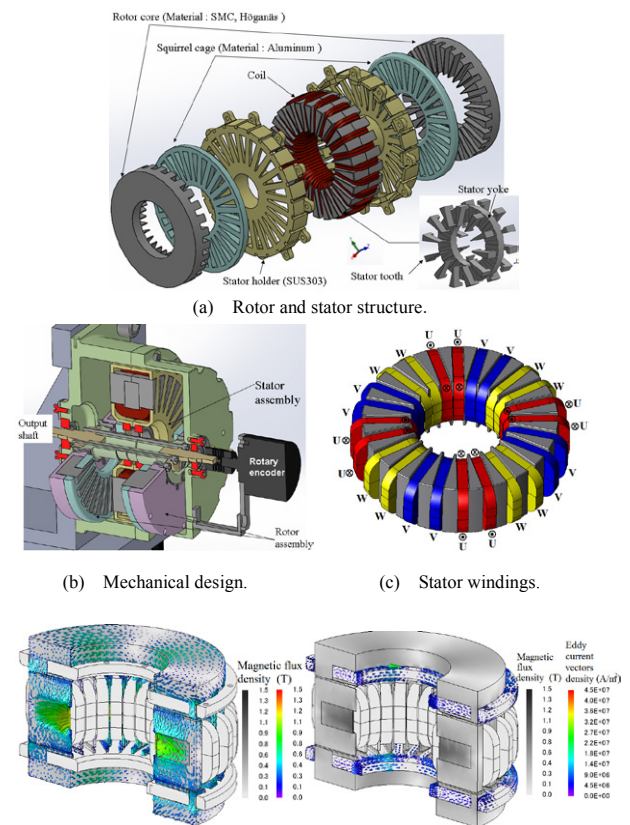


Fig. 1. Prototype of proposed pancake axial-gap induction machine.

Table I. Main specifications of prototype.

Stator and rotor outer diameter (mm)	120
Rotor back yoke length (mm)	10
Stator yoke length (mm)	15
Air-gap length	0.7 (one-side), 1.4 (both-side)
Armature winding connection	All-series, Y-connection
Number of armature coil turn (turn/tooth)	35
Resistance of armature coil (Ω /phase)	1.02 (average)
Slot combination (stator-vs.-rotor)	24 : 27

スク状のかご形二次導体内で滑りに応じて誘導電流が生じることで、この誘導電流と電機子磁束間の相互作用で電磁力が生じる。Table I に試作機の主要諸元を示す。

3. 原理検証機の試作

Fig. 2 に試作した原理検証機を示す。原理検証段階および

試作費低減のため、鉄心は Höganäs 社 Somaloy プロトタイプリング材 ($\phi 120, L 20$) から切削加工している。ステータコアは将来的な金型成形を見据えて Fig. 2 (a)のようにティースとヨークを2分割している。二次導体は A2017 材を切削加工し、Fig. 2 (b)に示すように SUS303 材の保持部材にロータコアとともにボルト締結している。電機子巻線は素線径 $\phi 0.8$ の AIW 丸線を 3D プリンターで試作した絶縁用ボビンを介して Fig. 2 (c), (d)に示すようにステータコアに巻いている。Fig. 2 (e)のように A2017 材から切削加工したハウジングに組み付けたのち、Fig. 2 (f)のようにモータベンチへ取り付けた。

4. 無負荷時自己始動特性の実機検証

提案モータの基礎的な特性を把握するために、直入れ時の自己始動特性試験を行う。Fig. 3 に実験環境システムを示す。電磁ブレーカを介して変圧器で電圧を可変しながら試作機を商用交流電源で駆動する。ロータリーエンコーダ等を用いて回転速度を検出する場合、ロータ単体のイナーシャ J_m にエンコーダのイナーシャ J_a も付加される。今回はそれらの影響を除外するため、タコメーター (HIOKI 製 FT3406) のアナログ出力機能を用いてオシロスコープで測定する。無負荷自己始動時は下式(1)の運動方程式において、負荷トルク $T_L = 0$ のため、摩擦力 $\mu_s r F_c$ (μ_s : 静摩擦係数, r : 作用点までの半径, F_c : 垂直抗力) と J_m で始動特性が決まる。Fig. 4 に印加電圧が $42.8 \text{ V}_{\text{rms}}$ の場合と $56.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ の場合の無負荷時直入れ始動特性の測定結果を示す。同図にてタコメーターのアナログ出力機能の制約により、 300 r/min 未達が不感帯のため始動直後から 300 r/min に達するまでの間は計測できていない。タコメーターの計測原理の都合上、過渡時の回転速度波形がステップ状に変化している。同図(a), (b)から直入れ直後は始動電流が流れてロータが急速に加速していき、定常速度が 1500 r/min となる。商用周波数 (60 Hz) で4極機を駆動したときの同期速度 (1800 r/min) に対して滑り $s = 0.17$ である。このとき始動直後から定常速度状態まで $42.8 \text{ V}_{\text{rms}}$ 時が 3.9 s , $56.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ 時が 1.4 s となる。

$$T_m + T_L - \mu_s r F_c = J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1)$$

5. まとめ

本論文ではパンケーキアキシヤルギャップ形誘導機の提案と試作機にて無負荷時自己始動特性の実機検証を行った。今後はインバータを用いてベクトル制御駆動したときの可変速特性および効率マップ等を明らかにする所存である。

文献

- (1) Tesla Motors HP, <https://www.tesla.com/>.
- (2) S.Jurkovic, M. Rahman, P. Savagian, and R. Dawsey : "Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin Hybrid-Electric Vehicle", SAE International Technical Paper, No. 2016-01-1220 (2016) (1992).

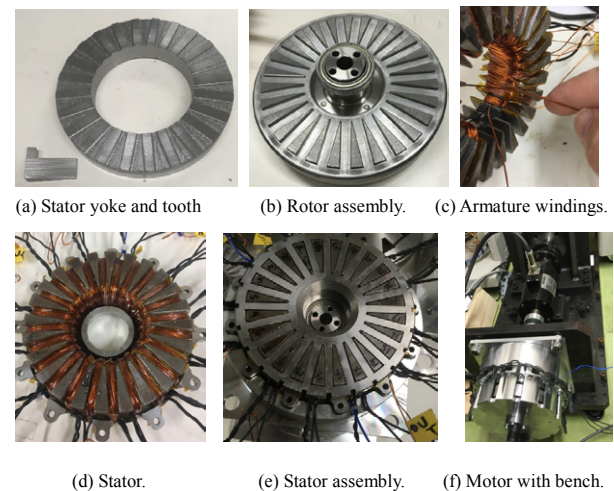


Fig. 2. Actual prototype.

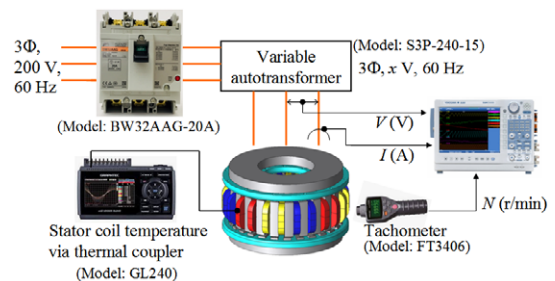
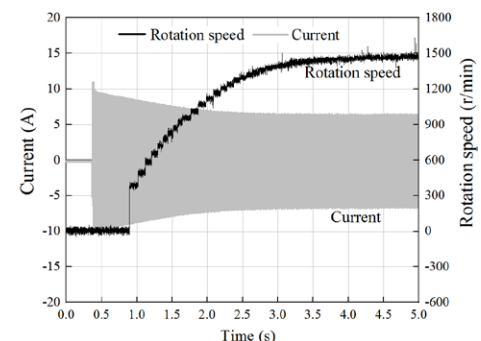
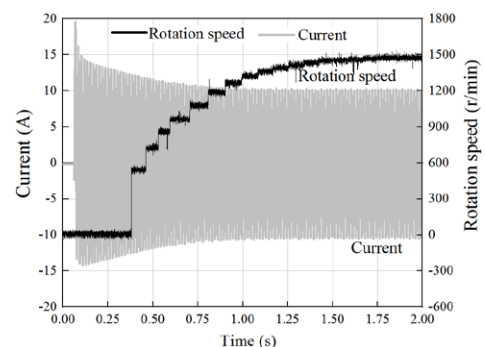


Fig. 3. Experimental setup.



(a) Applied voltage at $42.8 \text{ V}_{\text{rms}}$.



(b) Applied voltage at $56.4 \text{ V}_{\text{rms}}$.

Fig. 4. No-load line start characteristics with respect to applied voltage.