

集中巻ステータ構造を有する自己始動形自励式 巻線界磁モータの提案と実機基礎検証

青山 真大 (静岡大学), 水田 貴裕*, 深山 義浩, 伊藤 一将 (三菱電機)

Proposal and Experimental Verification of Line-Start Type Self-Excited Wound-Field Motor with Concentrated Winding Stator
Masahiro Aoyama (Shizuoka University), Takahiro Mizuta*, Yoshihiro Miyama, Kazumasa Ito (Mitsubishi Electric Co.)

1. はじめに

従来, ファンやポンプを負荷とする産業用汎用モータとしてシステムの低コスト化の要求から商用交流電源からの自己始動可能な誘導機 (IM) が広く用いられている。誘導機はインバータやセンサを不要とする簡素な駆動システムのため低コストであるが, 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。励磁電流が不要となる永久磁石式同期電動機 (PMSM) を採用することで高効率化が可能であるが, PMSM は原理的に自己始動できずインバータが必須となるため, システムコストの観点から広く普及するに至っていない。そこでロータ外周に二次導体を設けることで自己始動機能を持たせた自己始動形磁石式同期電動機 (LS-PMSM) の研究が進んでいる^{(1),(2)}。この種の電動機は同期時には大出力・高効率となるが, 非同期時の永久磁石磁束に起因したブレーキトルクや, 非同期磁束が永久磁石に鎖交することで発生する磁石内渦電流起因の減磁リスク等が問題となる⁽³⁾。さらに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集中巻ステータ構造で, さらに磁石フリーで IM よりも高性能を達成できるモータの開発に取り組んでいる。本稿では新しい駆動原理に基づく自己始動形自励式巻線界磁モータ (LS-SEWFM) の提案と実機による無負荷時同期入れ特性の評価結果を報告する。

2. 提案する新しい自己始動形モータ

Fig. 1 (a)に提案するモータの径方向断面図を示す。順突極構造のロータに2種類のロータ巻線を巻き, 突極間に補極 (35A230材) を配置した磁気回路となっている。CFRP-3Dプリンター (Markforged製 Mark Two使用, フィラメント: Onyx) で製作したバーを用いて補極を構造的に保持している。ロータ外径側には40本の二次導体バー (A2017材) が配置されている。二次導体バーはFig. 1 (b)に示すように極数のピッチで短絡結線されており, それぞれ短絡結線された2本の二次導体ペアは他のペアと電氣的に独立している。今回は4極機のため, 4極ピッチで二次導体バーが短絡結線

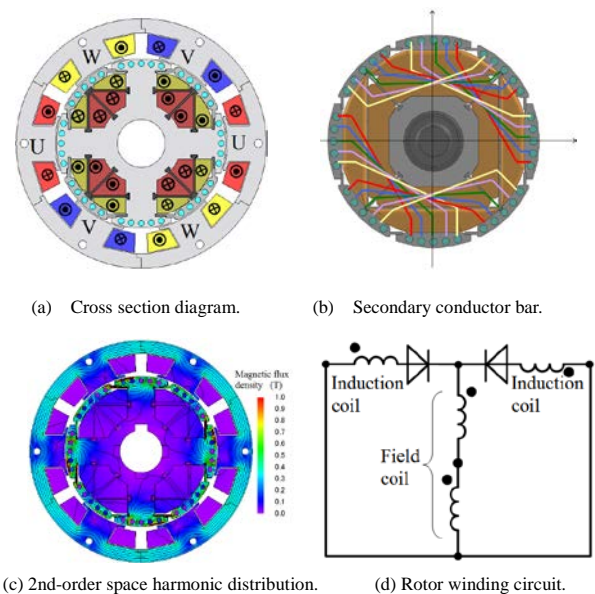


Fig. 1. Proposed line-start type self-excited wound filed motor.

Table I. Main specifications of 1st prototype.

| | |
|---|--------------------------|
| Stator outer diameter (mm) | 125 |
| Stack length (mm) | 80 |
| Armature winding connection | 2-parallel, Y-connection |
| Number of armature coil (turn/tooth) | 100 |
| Resistance of armature coil (Ω /tooth) | 0.84 |
| Number of induction coil (turn/pole) | 41 |
| Number of field coil (turn/pole) | 104 |
| Resistance of induction coil (Ω /pole) | 0.86 (average) |
| Resistance of field coil (Ω /pole) | 0.33 (average) |
| Resistance of secondary conductor bar ($m\Omega$ /bar) | 0.61 |

されており, Fig. 1 (c)に示す第2次空間高調波に対して同期引込み時に磁気結合しないようにしている。二種類のロータ巻線は集中巻ステータ構造に起因して不可避に発生する第2次空間高調波から起電力を得る誘導コイル (I-coil) とダイオードを介して界磁極を形成する界磁コイル (F-coil) であり, Fig. 1 (d)に結線回路を示す。文献(3)の空間高調波を利用した自己励磁技術に基づいており, 同期入れ時は空間高調波を界磁エネルギー源として F-coil が電磁石極を形成して同期駆動できる。一方, 直入れ始動時は二次導体バーにより IM の動作原理で駆動する。つまり, 直入れ直後は滑り周波数から始動トルクを得て加速し, 同期引き入れ時は第二次空間高調波を界磁エネルギー源として巻線界磁

形同期モータとして駆動する。研究室設備で実験を行うため、要求仕様からダウンサイズした仕様で設計しており、主要諸元は Table. I に示すとおりである。

3. 原理検証機の試作

Fig. 2 に試作した原理検証機を示す。補極を取り外した状態で素線径 $\phi 0.8$ のAIW導線を突極に巻いたのち、補極を取り付けて Fig. 2 (a)のように組み立てた。次に二次導体バーを Fig. 1 (b)で結線したのち、ロータ上で TO247 型カソードコモン形 SiC ダイオード (ローム製 SCS230AE2, $V_R = 650$ V, $I_F = 15$ A/leg) を用いて 1 極対で Fig. 1 (d)の整流回路結線して Fig. 2 (b)のようにレーシング処理をした。ステータは素線径 $\phi 0.8$ のAIW導線を用いて Fig. 2 (c)のように試作した。

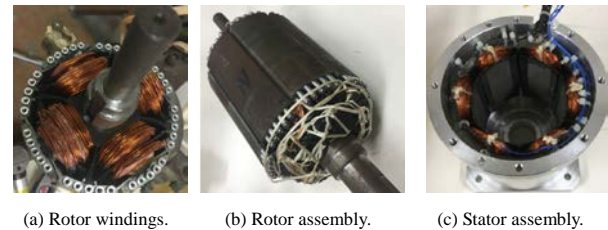
4. 無負荷時同期引入れ特性の実機検証

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変可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にエンコーダのイナーシャも付加される。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。試作機のイナーシャは文献 (4)の計測方法にて実測した結果、 0.013198 kgm^2 であった。差動プローブ (横河製 700925) と電流プローブ (RIGOL 製 RP101C) を用いて線間電圧と相電流を測定する。

Fig. 4 に印加電圧が 36.6 V_{rms} の場合と 68.6 V_{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 未満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)から印加電圧が低い状態で直入れ始動すると同期引き入れできず、IM 駆動となって、ある滑りの回転速度で回転する。同図(b)から十分な印加電圧で直入れ始動すると商用周波数 (60 Hz) で 4 極機を駆動したときの同期速度 (1800 r/min) まで同期引き入れできていることが確認できる。このとき始動直後から同期引き入れ後の定常状態まで 0.616 s となる。

5. まとめ

本論文では滑り周波数で自己始動し、第 2 次空間高調波を界磁源として同期引き入れする新しい動作原理に基づく自己始動形巻線界磁モータを提案し、試作機にて無負荷時同期引き入れ特性の実機検証を行った。今後は要求仕様に合わせてモータ設計を行い、ベンチマークのモータに対する優位性と課題を明らかにする所存である。



(a) Rotor windings. (b) Rotor assembly. (c) Stator assembly.

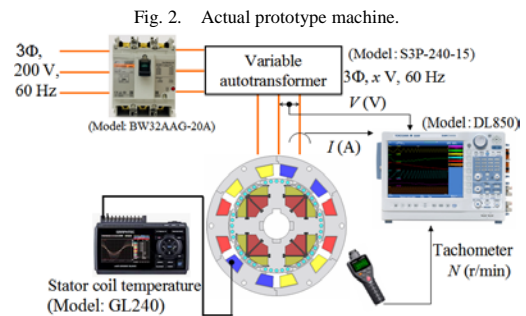
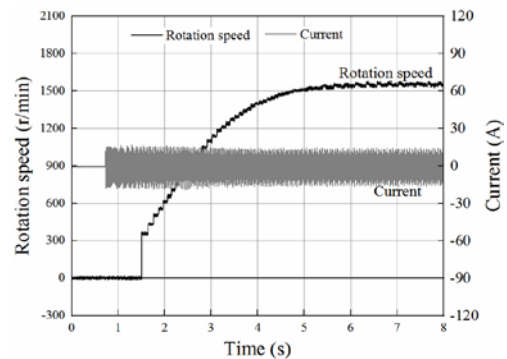
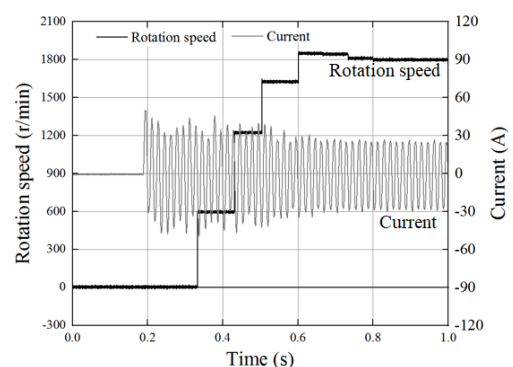


Fig. 3. Experimental setup.



(a) Applied voltage at 36.6 V_{rms} .



(b) Applied voltage at 68.6 V_{rms} .

Fig. 4. Line starting characteristics with respect to applied voltage.

文献

- 坪井・竹上・廣塚・中村:「自己始動形三相永久磁石同期電動機の一般解法」, 電学論 D, Vol. 131, No. 5, pp. 692-699 (2011).
- 栗原・涌井・久保田:「有限要素法によるハイブリッド形永久自作同期電動機の非同期時特性の解析」, 電学論 D, Vol. 112, No. 5, pp. 490-496 (1992).
- 青山・野口:「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ形磁石フリーモータの実機検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881(2015).
- 近藤・半田:「永久磁石同期主電動機の無負荷鉄損測定」, 平成 15 年電気学会全国大会, No. 5-019, pp. 28-29, (2003).