

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	金沢工業大学 工学部 電気電子工学科
職位または役職	講師
氏 名	津田 敏宏

1. 研究題目

永久磁石を内蔵した誘導モータのケージレス化とその動作解析に関する研究

2. 研究目的

本研究では、図 1 に示すようなケージの無い新構造のモータを考案し、その始動及び定常時における動作を明確にするものである。検討対象機はインバータを用いた可変速駆動が可能であるが、本助成期間においては自己始動での特性に着目し、検討を行った。

研究手順は以下のとおりである。

① 起動過渡特性の検証と巻線切替え条件の明確化

検討対象機を電源に直接接続すると、回転子の磁気突極性によってゲルゲス現象が発生する。この現象により非同期トルクが得られるので、永久磁石回転子をケージレスで自己始動させることができる。さらに、巻線の切替えを行えば、同期モータとしても動作させることが可能である。先に報告者はその始動特性を有限要素解析(FEA)で調査したが、巻線切替時に過大な過渡電流が流れ、回転子に動揺が発生することが明らかになった。これは、同期機における非同期投入と同様な事象と考えられ、その程度は切替時における投入位相、回転子速度等の条件に依存することが予想される。そこで、巻線切替時における回転子の挙動を投入位相、回転子速度、負荷条件(慣性モーメント含)といった複数の因子に対して調査し、検討対象機における好適な切替え条件を明確にする。

② 定常特性の評価

検討対象機ではゲルゲス現象によって非同期トルクが得られる。その速度・トルク特性は誘導モータのそれと類似しており、起動完了後は、負荷反抗トルクカーブの交点において一定速度で動作させることができる。一方、検討対象機は、巻線の切替えを行うと、8 極巻線が作る回転磁界と、回転子における 8 極のコンシクエント極が同期し、表面張付形の永久磁石同期モータとして動作する。

そこで、これら二つの運転モードにおける定常特性(始動時、同期運転時)を 2D-FEA で評価し、実機評価のための試作機設計方針を定める。特に、市販の標準フレームサイズ(100L)のモータ(200V, 1.1kW 相当)と鉄心寸法を合わせ、始動と定常特性の両方を満足し得る巻線仕様を明確にする。なお、検討対象機については実機検証を行う計画であり、上記 ①と②の検討結果を踏まえ、③の試作機製作を行う。

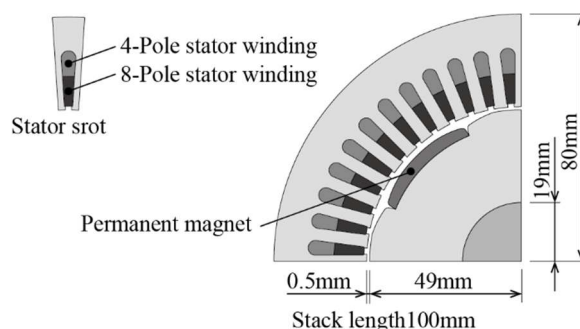


図 1 検討対象機の断面図

3. 研究内容及び成果

3・1 定常特性の評価 まず、図 1 の検討対象機に対し、始動時のトルク特性を FEA により明らかにした。図 2 にその結果を示す。同図のように、今回設計したモデルの始動トルクは $3.17\text{Nm}(=T_{pm})$ であった。この値は、汎用の誘導モータにおける始動トルクに比べてかなり小さい。これに対し、永久磁石を取り除いたモデルを作成し、その始動トルクを計算した。結果、図 2 のように $6.83\text{Nm}(=T_{air})$ となり、永久磁石有の場合に比べて大きな値を示した。この要因は、始動中、図 3(a)のように、PM からの磁束により突極部で磁気飽和が生じたことによる。すなわち、磁気飽和によって、当該部分の磁気抵抗が増加し、突極性が低下したため、始動トルクが低下したものと考える。以上の結果、ゲルゲス現象を利用することで、ケージレス化は実現できるものの、PM 磁束によって始動トルクが低下する問題が明らかになった。

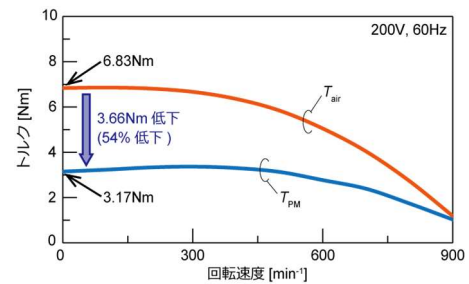
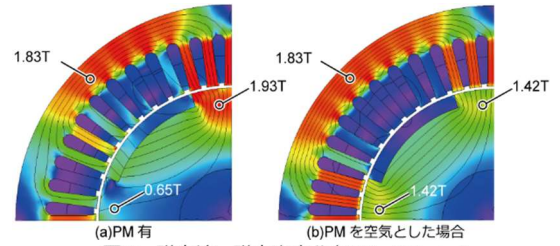


図 2 回転速度に対するトルクの変化

図 3 磁束線・磁束密度分布 ($N_r=300\text{min}^{-1}$)

3・2 始動トルクの向上策 始動トルクを向上させるために、図 1 における回転子鉄心を積層から塊状に変更し、その始動特性を調査した。この場合のトルク特性を図 4 に示す。同図のように、塊状鉄心とすることで、始動トルクは 13.2Nm と大きく増大し、本向上策の有効性が確認できる。その他、効率は 73.4% 、力率は 0.932 となり、比較的良好な特性が得られた。

以上のように、本開発機を成立させるには、回転子鉄心は塊状とするのが望ましいことが明らかとなった。

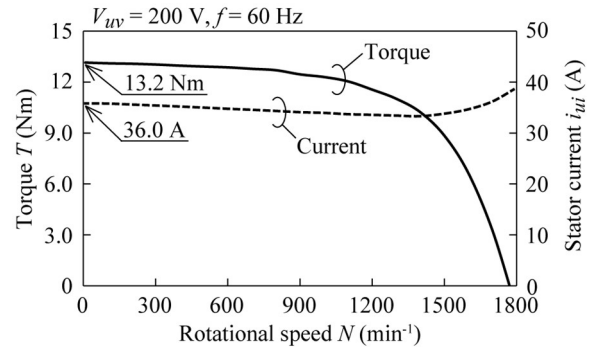
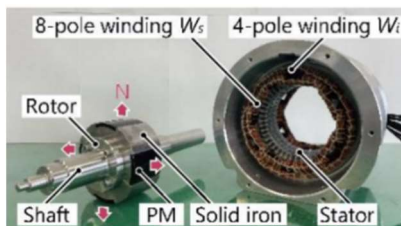


図 4 塊状鉄心に変更した場合のトルク特性

3・3 動作確認のための試作機 図 5 に試作機の固定子と回転子を示す。固定子は、50A1000 の電磁鋼板を 50mm 積層して形成し、スロット数は 48 である。固定子巻線は、始動用の三相巻線 W_i を 4 極、定常運転用の三相巻線 W_s を 8 極とした。図 4 の結果に基づき、回転子の鉄心は、4 個の突極で構成した塊状鉄心(S45C) で製作した。その突極間には同方向に着磁された 4 つの PM(N40) を接着した。これにより、突極部にコンシクエント極が形成され、合計で 8 極の PM 回転子となる。試作したモータは図 1 のような回転子構造を有するため、始動時は塊状鉄心の回転子を持つ誘導モータ、定常運転時はコンシクエント極の PM 回転子を持つ同期モータとして動作する。



(a) モータ外観



(b) 回転子前断面



(c) 回転子外観

図 5 製作した試作機の外観

3・4 実験結果の一例 図 6 に W_s を開放した状態で、 W_i に 200 V, 60 Hz の電圧を印加し、無負荷で始動させた際の過渡特性を示す。図 6(b) から、開発機の回転子は、速やかに自己始動することを確認した。図 6(c) のように、 W_s には起電力が誘導されており、その周波数は 120Hz であった。これは、回転子上に 8 極の磁極が形成されていることを示している。そのため、8 極の同期速度で巻線を W_s に切替えると、本開発機はコンシクエント極の PM 同期モータとして動作できる。

4. 今後の研究の見通し

今回開発したモータにおける利点は以下のとおりである。

- 1) ケージを持たない構造であるため、従来の PM 同期モータや誘導モータに比べ、構造は著しく簡単になる。また、かご形導体を挿入あるいはダイカストで形成するためのプロセスが無くなるなど、製造に費やすコストや労力が軽減できる。
- 2) 従来の PMIM とは異なり、電源に接続するだけで自己始動できる。このため、ファンやポンプ等の産業用機器としての応用が検討できる。
- 3) コンシクエント極を採用しているため、磁石使用量は少ない。

以上のように、ケージレス化を図って構造を簡単化しただけでなく、従来の PMIM にはなかった自己始動能力が得られる。また、製作の工数並びに使用材料の低減も期待できることから、コスト低減に適したモータになり得る。今後は引き続き、性能向上のための構造案を見出していきたい。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

◇学術論文(査読付き)

- 1)津田敏宏・得田直紀:「二重巻線式リラクタンスモータの動作解析」, 電学論 D, Vol.142, No.7, pp.526-532

◇特 許

- 1)津田敏宏・深見正・加藤史也:「回転電機、回転電機を備える回転電機システムおよび回転電機の制御方法」

◇学会発表

- 1)加藤史也・津田敏宏:「ケージレス方式の自己始動形永久磁石同期モータの特性」, MAGDA2021, OS-3-1, (2021-12)
- 2)坂根弥樹・津田敏宏:「ケージレス方式の自己始動形永久磁石同期モータの試作」, 2022 年電気学会産業応用部門大会, Y-58, (2021-9)
- 3)T.Tsuda, H.Sakane, S. Imura, and F. Kato:” Transient and Steady-State Performance of a Consequent-Pole Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor,” 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (2022-12)

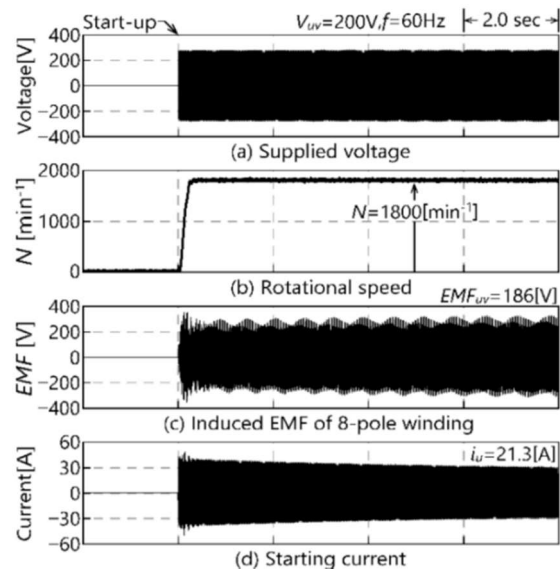


図 6 試作機の無負荷始動特性