

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420240

研究課題名(和文)インバータを使用しないプレミアム効率単相永久磁石モータの最適設計

研究課題名(英文)Optimal design of a single-phase capacitor-run premium-efficiency permanent-magnet motor without an inverter

研究代表者

栗原 和美 (KURIHARA, Kazumi)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：30143142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：プレミアム効率を目指した単相自己始動形永久磁石モータの最適設計を初年度に行い、2年目に試作を行った。最終年度に試作機の実験を行い、その研究成果を国際会議ISEF2015で発表した。実験結果から、試作機は十分な自己始動能力を有し、定格出力70Wにおいて効率が82%に達した。IECでは現在出力120W以上のACモータに対して、プレミアム効率(IE3)、スーパープレミアム効率(IE4)が規定されている。それによると、50Hz、2極、120WでのIE3、IE4の効率値がそれぞれ60.8%、66.5%であることから、試作機はプレミアム効率は勿論、スーパープレミアム効率も大きく超えていることが判明した。

研究成果の概要(英文)：This study presents a small single-phase capacitor-run permanent-magnet motor with super premium efficiency. There is the trade-off relation between efficiency and starting torque in line-start permanent-magnet motors that have the braking torque by permanent magnets in starting. The small but high-efficiency single-phase capacitor-run permanent-magnet motor with fully starting capability has been designed, built and tested.

IE4 super-premium efficiency of the motor less than 0.12 kW is not presented. Standard IEC/EN 60034-30-1 on efficiency classes of line operated AC motors was published by IEC on March 6, 2014. The efficiency value of IE4 of 2-pole, 50 Hz, 0.12 kW motor is 66.5%. The rated output power 70 W of our motor is very low. Nevertheless, it has been found that the efficiency of our proposed motor with the excellent starting capability is 82.0%, and superior to 0.12 kW IE4 super-premium one.

研究分野：電気機器学

キーワード：電気機器 省エネルギー機器 単相永久磁石モータ プレミアム効率 スーパープレミアム効率 自己始動

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災後、省エネルギー化がますます重要となっている。この動きは日本だけでなく、海外でも進展している。これは国際規格 IEC60034-30 で規定されているモータの効率クラスが、欧米を中心に IE2(高効率)から IE3(プレミアム効率)へ着実に移行していることから明らかである。

一般家庭における省エネルギーでもモータの高効率化は重要である。電気冷蔵庫や電気冷凍庫は、省エネ法が定める特定機器に該当し、機器の効率向上を図り家庭部門のエネルギー消費量を抑制し世界最高水準のエネルギー効率の実現が要望されている。これらの機器の省エネには、コンプレッサを駆動するモータの高効率化が必須である。駆動モータには電源が単相であることと、頻繁に起動・停止を繰り返すことから、単相誘導モータが使用されてきたが、力率や効率が低いため省エネには向いていない。また、永久磁石モータは高効率であるが、高価なインバータを必要としている。かご形巻線をもつ単相永久磁石モータはインバータを必要とせず、同期運転時には高効率となる。しかし、始動時には永久磁石と逆相分磁界によるブレーキトルクがあり、負荷トルクがある状態では同期に入らないといった最大の欠点があった。

申請者は既に単相自己始動形永久磁石モータの定常及び過渡特性を高精度に算定できる解析法を構築し、定格負荷トルクがかかった状態で始動し、同期に引き入れ可能で、しかも高効率運転できる回転子構造の設計に成功している。しかし、効率改善と始動特性改善とはトレードオフの関係にあるため、更なる高効率化、即ち、プレミアム効率、スーパープレミアム効率(IE4)を目指すためには、始動特性解析と鉄損を考慮した負荷特性解析を組み込んだモータの最適設計を行わなければならない。

2. 研究の目的

本研究は、省エネ法の機械器具の世界最高水準のエネルギー効率実現に向けて、家庭で使用される単相モータの高効率化を目指している。申請者は、既に定格負荷トルクがかかった状態で始動し、同期に引き入れ可能で、しかも高効率運転できる回転子構造の設計に成功している。図1はその回転子の写真である。本研究では、申請者が独自に開発した単相モータの定常及び過渡特性を高精度に算定できる解析法と応答曲面法を組み合わせ最適設計手法を用いて、低損失の鉄心材料の選定を含めた固定子構造と巻線仕様の最適化、さらに、永久磁石とかご形巻線の形状、配置を工夫し、コンプレッサ等の重負荷でも、頻繁に起動・停止を繰り返すことができるプレミアム効率、スーパープレミアム効率を目指した究極の単相永久磁石モータを開発したい。

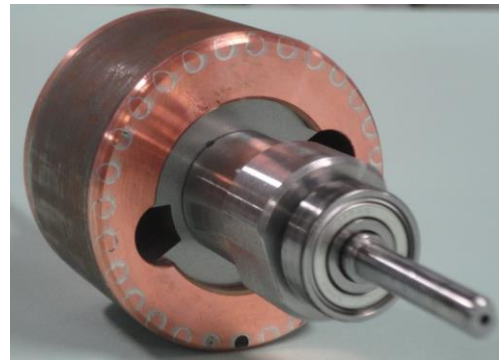


図1 単相永久磁石モータの回転子

3. 研究の方法

本研究は3年の期間で行った。平成25年度(1年目)は、モータの効率に重点を置いた鉄損解析を中心に、まず低鉄損となる固定子の最適形状を決定するためのシミュレーションを行った。次に、最適化した固定子と回転子を組み合わせて、負荷トルクがある場合の最適な始動特性を確保できるモータ構造を決定した。シミュレーションでは有限要素法と応答曲面法を用いて、始動特性と効率が最適となるモータ構造と巻線仕様を最終決定した。平成26年度(2年目)に、最適設計手法に基づいて決定した単相永久磁石モータを(株)日立製作所にて試作、そして、共通ベース上に、初年度に購入したヒステリシスブレーキ、トルク検出器、試作モータを連結、配置した実験装置を製作した。平成27年度(最終年度)に実験により、試作モータがプレミアム効率以上の効率を保持し、負荷トルクがかかった状態で同期引き入れができたかを検証した。

4. 研究成果

自己始動形永久磁石モータは一般に効率と始動能力がトレードオフの関係があり、銅損を減らすために固定子巻線の誘導起電力を向上させると、効率は向上するものの始動時にブレーキトルクが大きくなり、始動能力が低下する。単相モータでは逆相分磁界の影響があり、この現象がさらに顕著になっている。

本研究ではまず、この原因が固定子鉄心の磁気飽和に起因していることを有限要素法による磁界解析結果から明らかにした。次に磁気飽和を増加させないで、誘導起電力のみを増加させる方法を考えた。ここでは回転子の永久磁石による有効磁束を増やさず、固定子巻線数のみを増やすことで誘導起電力を増加させ、自己始動能力を低下させず、効率向上を図った。そして、従来機と固定子巻線仕様を最適化した試作機との実験結果の比較により、試作機の効率が一段と向上することを明らかにした。また、鉄損を減らすために、低鉄損の鉄心材料を用いた。

(1) モータの構造

図2と図3に試作した固定子の写真と断面図をそれぞれ示す。

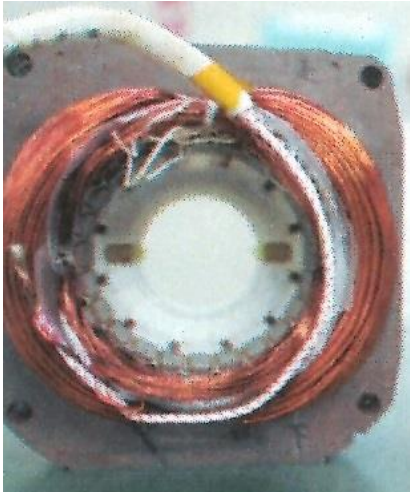


図2 試作した固定子の写真

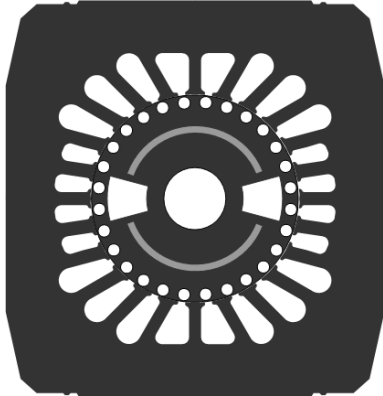


図3 試作した固定子の断面図

次に、図1の回転子と図2の固定子を組み合わせた試作機の実験特性を従来機と比較して示す。

(2) 効率と誘導起電力

図4に同期運転時における出力に対する効率特性を示す。試作機の効率は従来機と比較して、すべての出力に対して大きいことが判明した。

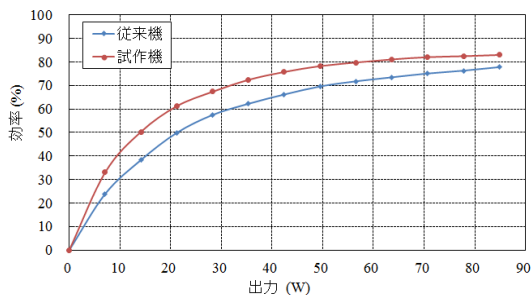


図4 出力に対する効率特性(実測値)

また、表1に、定格負荷における試作機と従来機の効率(実測値)の比較を示す。試作機は定格出力70Wにおいて効率が82%に達した。これは従来機の効率の75.1%に対して、試作機の効率が7%向上したことを意味する。さらに、IEC(国際電気標準会議)では現在出力120W以上のACモータに対して、プレミアム効率(IE3)、スーパープレミアム効率(IE4)が規定されている。それによると、50Hz、2極、120WでのIE3、IE4の効率値がそれぞれ60.8%、66.5%であることから、試作機はプレミアム効率は勿論、スーパープレミアム効率も大きく超えていることが判明した。

表1 定格出力時の効率比較(実測値)

モータ	固定子巻線の巻数 (主巻線/補助巻線)	効率(%)
従来機	372/168	75.1
試作機	400/168	82.0

次に、表2に永久磁石による誘導起電力の比較を示す。試作機の効率が向上した理由は、誘導起電力が上昇して、銅損が押さえられ、低鉄損の鉄心材料を用いたことにある。しかし、表2から分かるように、試作機の誘導起電力は従来機よりも6.3Vも高くなっている。このことは始動時において、誘導起電力によるブレーキトルクの上昇に繋がっている。

表2 誘導起電力の比較(実測値)

モータ	固定子巻線の巻数 (主巻線/補助巻線)	主巻線の誘導起電力 (V)
従来機	372/168	78.7
試作機	400/168	85.0

(3) 始動特性

試作前のシミュレーションにおいて、定格トルクがかかった状態でも、自己始動が可能で同期に引き入れ可能であることを検討した。図5は、始動運転中に一定の定格トルクがかかった状態の直入れ始動特性を示す。誘導起電力が85Vの場合でも同期引き入れ可能であることがわかる。

実際に実験を行った場合、定格トルクの80%の一定負荷トルクで自己始動が可能で同期引き入れ可能であることが判明した。図6に80%負荷トルクでの直入れ始動特性を示す。

ファン負荷のような流体負荷では、速度の自乗に比例して、負荷トルクが変化するため、

80%の一定負荷トルクという過酷な条件で直入れ始動可能で、さらに高効率である本提案モータは、インバータが不要で省エネ運転モータとして、今後有望であると考えられる。

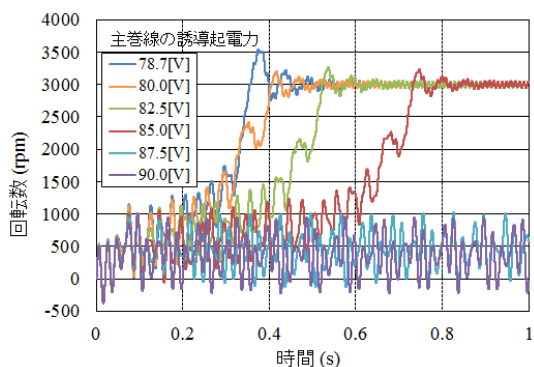


図5 直入れ始動特性(計算値)

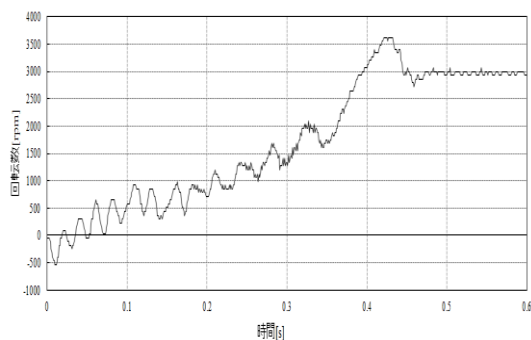


図6 直入れ始動特性(実測値)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

- ① Kazumi KURIHARA, Kazuki NAGAYAMA, Hirotaka FUKUDA, and Tomotsugu KUBOTA, “Optimal Design for Super Premium Efficiency of a Small Single-Phase Capacitor-Run Permanent-Magnet Motor”, ISEF 2015 - XVII International Symposium on Electromagnetic Fields, September 10-12, 2015, Valencia (Spain)
- ② 長山 和貴、栗原 和美、単相永久磁石モータの固定子巻線方式が電動機特性に及ぼす影響、電気学会モータドライブ家電・民生合同研究会、2015年3月4日、電気学会(東京)
- ③ 新居 郁弥、栗原 和美、単相自己始動形永久磁石同期電動機の高効率化に関する研究、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2013年11月24日、日立シビックセンター(日立)

- ④ 新居 郁弥、栗原 和美、祖田 直也、単相自己始動形永久磁石モータのプレミアム効率化のための鉄損低減、電気学会回転機研究会、2013年11月13日、東北大学(仙台)

- ⑤ 栗原 和美、新居 郁弥、自己始動形永久磁石モータの三相と単相における最適ロータ構造、電気学会回転機研究会、2013年11月13日、東北大学(仙台)

[その他]

ホームページ等

<https://info.ibaraki.ac.jp/Profiles/3/000236/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 和美 (KURIHARA, Kazumi)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：30143142

(2) 研究分担者

祖田 直也 (SODA, Naoya)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号：80323210

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

久保田 朋次 (KUBOTA, Tomotsugu)
新居 郁弥 (NII, Fumiya)
長山 和貴 (NAGAYAMA, Kazuki)
福田 大昴 (FUKUDA, Hirotaka)