

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560288

研究課題名（和文） 自己始動形単相永久磁石モータの最適設計

研究課題名（英文） Optimal design of single-phase line-start permanent-magnet motors

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

研究成果の概要（和文）：電気冷蔵庫等に代表される家庭部門の省エネには、駆動源である単相モータの高効率化が急務である。研究者らは、既に三相交流モータにおいて誘導モータに代替可能な自己始動形永久磁石モータの高効率化（出力 600W で効率 87.3%、力率 98.1%）に成功している。本研究ではその技術を単相モータに応用し、モータの性能をシミュレーションのみで高精度に算定できる解析手法を構築し、単相誘導モータに代替可能な高効率自己始動形単相永久磁石モータ（出力 113W で効率 80.0%、力率 94.2%）の最適設計に成功した。

研究成果の概要（英文）：Small and fractional horsepower single-phase motors are widely used in all aspects of domestic, utility, and special-purpose commercial markets. In this study, a successful rotor design with high efficiency and high starting performance of the line-start single-phase PM motor has been developed. The rotor configuration with the excellent start-up and synchronization capability has been obtained from the simulation results using the finite element method. The rotor was designed, built and used for measuring the starting characteristics. The efficiency of the proposed motor was 80.0% at 113W. It has been found from the experimental results that the proposed motor has the excellent start-up and synchronization capabilities under full-load torque.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：電気機器工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

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、効率、自己始動

## 1. 研究開始当初の背景

電気冷蔵庫や電気冷凍庫は、省エネ法が定める特定機器(23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、力率や効率が低い省エネには向いていない。近年、高効率の観点から、希土類磁石を

用いた自己始動形モータが単相誘導モータの代替機として注目を浴びている。しかし、自己始動形単相永久磁石モータは単相誘導モータ同様、始動用と運転用のコンデンサの切り替えにより、回転磁界を作るため完全な円回転磁界とはならず、逆相分磁界を含む。そのため、この種のモータを設計する際、二相対称座標法と  $d$ - $q$ 変換を組み合わせた解析法を用いなければならないが、モータ特有の鉄心の磁気飽和や空間高調波の影響を考慮できないといった欠点や、最も重要な同期引き入れを含む始動特性のダイナミックな過渡現象を考慮できないといった欠点があった。自己始動形単相永久磁石モータの直入れ始動特性を正確にシミュレーションできる解析法を確立し、次に、始動能力に優れ、高効率を得られるモータの最適設計技術を確立する必要がある。

## 2. 研究の目的

研究代表者は、既に民間企業との共同研究において、従来のコンプレッサ駆動用の単相誘導モータの代替機として、自己始動形単相永久磁石モータの特性解析を行っており、実験結果との比較により、その解析法の妥当性を検証している。しかし、この単相永久磁石モータはプロトタイプであり、効率は単相誘導モータと同等である。本研究では、申請者らが開発した解析法と応答曲面法を用いて、さまざまな回転子構造において、磁石形状、スキュー角、コンデンサ容量に対するモータの効率、トルクリプル、同期引き入れ特性を求め、最大効率となる回転子構造を決定し、単相誘導モータに代替できる究極の自己始動形単相永久磁石モータを開発したい。そして、日本のモータ製造メーカーにその技術を伝えたい。本研究で得られる高効率・高力率単相永久磁石モータは、通常低効率・低力率単相誘導モータに容易に代替できるので、省エネルギーに極めて優れている。この種のモータの最適設計の手法が確立できれば、試作なしでしかも短期間で設計ができるため、日本の電気機器製造メーカーの発展に寄与でき、ひいては地球環境の維持保全に不可欠な省エネルギー機器の発展に寄与できる。

## 3. 研究の方法

本研究は3年の期間で行った。前半の1年間は、自己始動形永久磁石回転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。研究代表者が長年に亘り研究した自己始動形埋込磁石モータの有限要素解析技術を用いて、十分な始動トルク、同期引き入れトルクをもち、高効率となる回転子構造の最適化を行った。最適化に際しては、代表者が開発した有限要素解析法によるシミュレーションに応答曲面法を適用して、磁石形状の他にスキュー

角、コンデンサ容量をパラメータとして、逆相分磁界による脈動トルクの低減も図った。

後半は最適設計に基づいて決定した自己始動形永久磁石回転子を、過去に共同研究を実施した(株)日立製作所日立研究所にて試作、実験により、始動性能や負荷時の効率、力率が最適化されたかを検証し、自己始動形単相永久磁石モータの最適設計技術を構築した。

## 4. 研究成果

### (1) 有限要素解析と応答曲面法による最適設計技術の確立

#### ① 有限要素解析技術の構築

自己始動形単相永久磁石モータの最適化の第一段階として、プロトタイプモータの定格出力において、運転用コンデンサ容量に対する効率、脈動トルクを求め、効率の最大化、脈動トルクの最小化するコンデンサ容量値を求めることに成功した。

図1は自己始動形単相永久磁石モータのプロトタイプ回転子の構造図を示す。図2はプロトタイプモータの永久磁石による磁束分布を示す。

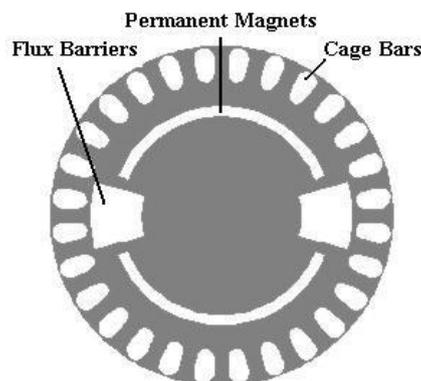


図1 プロトタイプモータの回転子構造

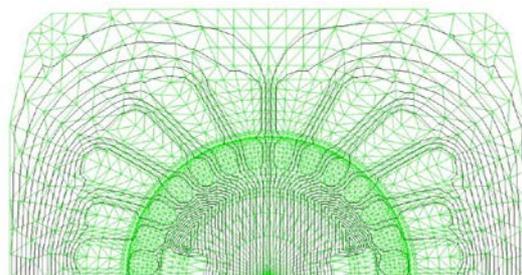
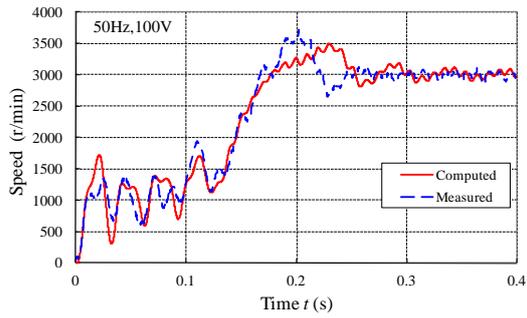


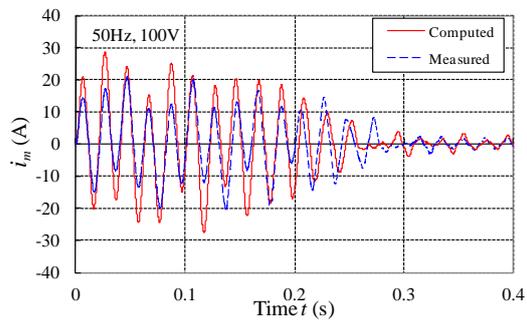
図2 プロトタイプモータの磁束分布

本モータは単相電源で駆動するため、回転磁界は円回転磁界とはならず、電源周波数の2倍にあたる逆相分による脈動トルクが発生する。有限要素解析では、モータが実際に運転している状態でのシミュレーションを可能にしている。解析法の妥当性を示すために、プロトタイプの始動時と同期運転時の実験結

果との比較を図3と図4にそれぞれ示す。

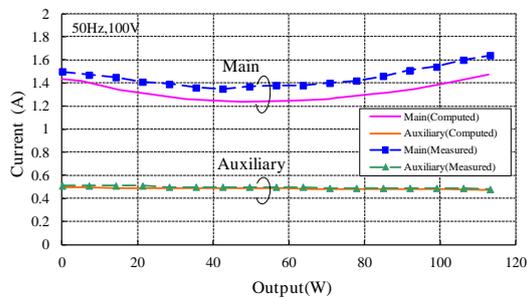


(a) 速度応答

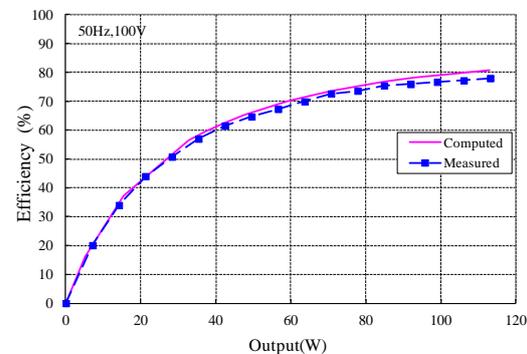


(b) 電流応答

図3 プロトタイプモータの始動特性



(a) 出力に対する電流



(b) 出力に対する効率

図4 負荷特性

図3では、電磁界、電気回路、運動方程式を連成して解く、時間刻み有限要素解析技術で研究代表者が独自に開発した解析手法が採用されている。図から、シミュレーション結果と実験結果がよく一致し、解析法の妥当性が検証されている。横軸が時間で、縦軸が速度(回転数)と主巻線電流である。図4は負荷運転状態での出力に対する主巻線電流、補助巻線電流、効率をそれぞれ示す。図3と同様に、シミュレーション結果と実験結果がよく一致し、解析法の妥当性が検証されている。これにより、この種のモータを試作することなく、本解析法を利用して、最適設計することが可能になった。

## ② 応答曲面法による最適設計

次に、第二段階として、脈動トルクの減少と効率向上に効果が期待できる (i) 運転コンデンサの容量、 (ii) 固定子スキューピッチ の二つの重要なパラメータとする単相永久磁石モータの最適設計のための解析法を確立する。ここで解析手法として「マルチスライスモデルを採用した時間刻み有限要素法」と「応答曲面法」を組み合わせた方法を提案している。ここで脈動トルクが最小となるコンデンサの容量値とスキューピッチを同時に求めることに成功した。図5に脈動トルクの応答曲面を示す。モータの回路を図6に示す。

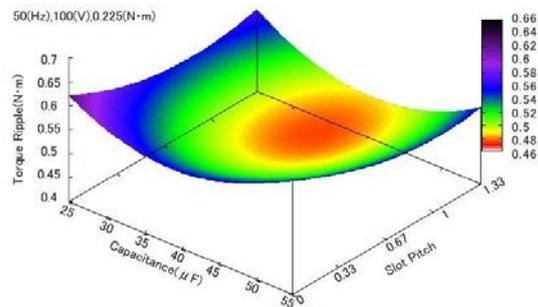


図5 脈動トルクの応答曲面

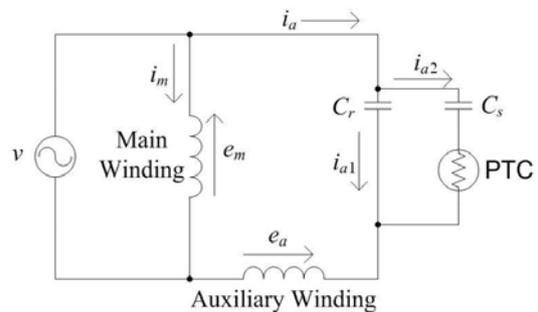


図6 モータの回路

図5から、運転コンデンサ容量  $C_r$  が  $37.5 \mu\text{F}$ 、固定子スロットスキューピッチ が  $0.97$  のと

きに、トルクリプルが最小になることがわかる。これにより、トルクリプルの低減が図れることが明らかになった。

次に、本モータの効率最大化のために提案手法を適用し、効率が最大となるコンデンサの容量値とスキューピッチを同時に求めることも成功している。図7に、効率の応答曲面を示す。

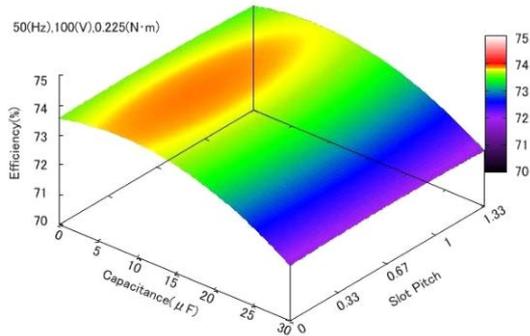


図7 効率の応答曲面

図7から、運転コンデンサ容量 $C_r$ が $7.25 \mu\text{F}$ 、固定子スロットスキューピッチが $0.51$ のときに、トルクリプルが最小になることがわかる。これにより、効率の向上が図れることも明らかになった。

以上のように、研究の前半の期間に目標としていた本モータの最適設計技術を確立することができた。研究の後半では、回転子内の永久磁石配置に着目し、更なる高効率化と始動特性改善を図り、図8に示す回転子のモータ(写真)を試作した。

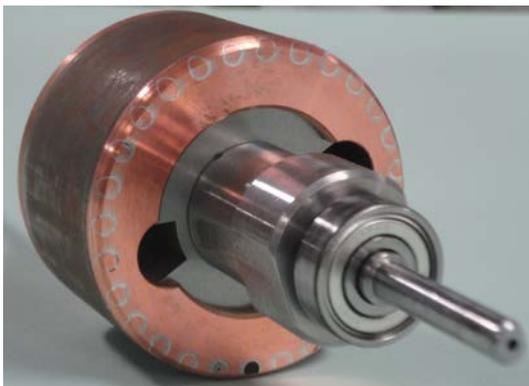


図8 最適設計に基づいた試作回転子

## (2) 最適設計したモータの試作とその性能評価

図8の回転子構造は、前年度のシミュレーション結果に加えて、高効率を維持したまま、さらに始動能力を向上した回転子形状をシミュレーションより決定し、研究2年目に回転

子の設計、試作を行った。試作した回転子を固定子に挿入した試験機を実験装置にセットし、実験を開始した。図9に実験装置を示す。



図9 実験装置

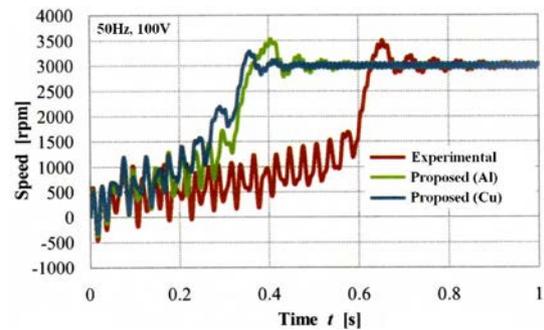


図10 シミュレーションによる始動特性

この種のモータ効率は始動能力とトレードオフの関係にあり、効率を向上させると始動トルクや同期引き入れ特性が低下し、自己始動が困難になることが知られている。

本研究では、効率を向上させ、しかも、大幅に始動能力を向上させている。図10は、試作前の始動特性のシミュレーションで、同じ条件で始動させた場合、プロトタイプ(図では実験機と表記)のものより、最適設計した提案タイプ(Cu: 回転子導体が銅バー)が同期速度に達する時間が短く、始動能力が優れていることがわかる。

図11に提案タイプの磁束分布を示す。

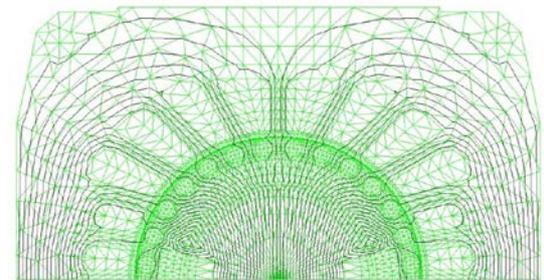


図11 提案タイプモータの磁束分布

図12に提案タイプの始動特性(実測値)、図

13 に効率特性(実測値)、図 14 に力率特性(実測値)をそれぞれ示す。

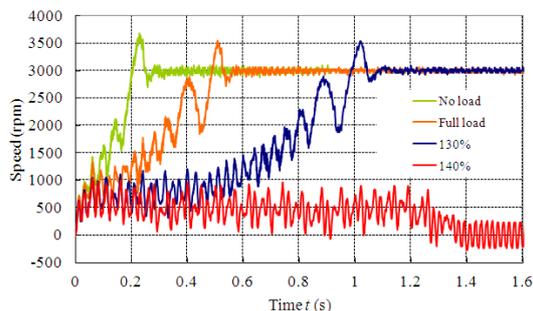


図12 提案タイプモータの始動特性(実測値)

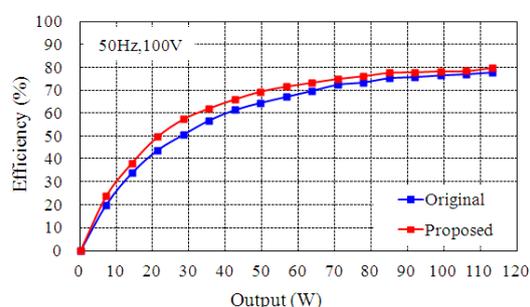


図 13 提案タイプモータの効率(実測値)

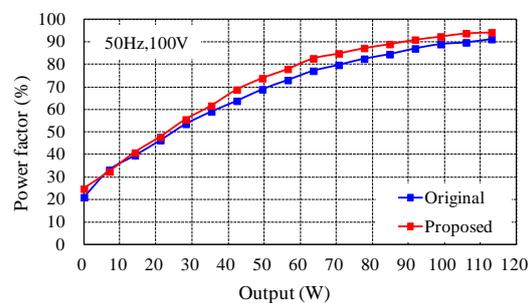


図 14 提案タイプモータの力率(実測値)

図 12 から、提案タイプモータの始動能力は優れ、定格電圧において定格トルクの 1.3 倍の一定負荷をかけた場合でも、同期引き入れが可能であることがわかる。さらに、図 13 から、提案タイプでは、プロトタイプ(図ではオリジナルと表記)に比べて、軽負荷から重負荷まで、効率が低いことがわかった。同様に、図 14 から、提案タイプでは、プロトタイプ(図ではオリジナルと表記)に比べて、軽負荷から重負荷まで、力率が低いことがわかった。

本研究で提案した単相誘導モータに代替可能な高効率自己始動形単相永久磁石モータは、出力 113W で効率 80.0%、力率 94.2%に達し、最適設計に成功したといえる。

## 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)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M.Azizur RAHMAN, Ali M. OSHEIBA, Kazumi KURIHARA, (他4名, 3番目), “Advances on Single-Phase Line-Start High Efficiency Interior Permanent Magnet Motors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 3, 2012, pp. 1333–1345, 査読有
- ② 堀井龍夫、吉村智萌、木村孝之、祖田直也、栗原和美、硬磁性材料に関するマイナーループを用いた移動係数の実験的決定方法、日本磁気学会誌、Vol. 35, pp. 17–21, 2011, 査読有
- ③ Kazumi KURIHARA, Tomotsugu KUBOTA, Masahiro HORI, “Steady-state and transient performance analysis for a single-phase capacitor-run permanent-magnet motor with skewed rotor slots”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, 2010, pp. 44–51, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Kazumi KURIHARA, Tomotsugu KUBOTA, Daisuke NITAWAKI, “Rotor design for high starting performance of a self-starting single-phase permanent-magnet motor”, International Symposium on Electromagnetic Fields (ISEF2011), 2011.9.2, マデイラ(ポルトガル)
- ② M. Azizur RAHMAN, Hossan Mohammad ZUBAYER, Kai WANG, Kazumi KURIHARA, (他3名, 4番目), “Single Phase Line-Start High Efficiency Interior Permanent Magnet Motors”, International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2011), 2011.5.16, ナイアガラフォールズ(カナダ)
- ③ Kazumi KURIHARA, Takahiro ITO, Yuki IMAIZUMI, Tomotsugu KUBOTA, “Efficiency Maximization of a Single-Phase Capacitor-Run Permanent-Magnet Motor Using Response Surface Methodology”, International Conference of Electrical Machines and Systems (ICEMS2009), 2009.11.16, 東京
- ④ Kazumi KURIHARA, Yuki IMAIZUMI,

Tomotsugu KUBOTA, “Torque Ripple Minimization of a Single-Phase Capacitor-Run Permanent-Magnet Motor Using Response Surface Methodology”, International Symposium on Electromagnetic Fields (ISEF2009), 2009.9.10, アラス(フランス)

[図書] (計 1 件)

- ① Kazumi KURIHARA, Tomotsugu KUBOTA, Yuki IMAIZUMI, Springer, “Computational Methods for the Innovative Design of Electrical Devices”, 2010, pp. 115–128

[その他]

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

## 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

堀井 龍夫 (HORII TATSUO)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号：80114023

### (4) 研究協力者

久保田 朋次 (KUBOTA TOMOTSUGU)  
茨城大学・工学部・技術職員