

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560343

研究課題名(和文) 省エネルギーに貢献する新構造PM補助突極形同期機の要素技術研究

研究課題名(英文) Study on technology elements of new PM-assisted salient-pole synchronous machine structure for contribution to energy conservation

研究代表者

島 和男 (Shima, Kazuo)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20410285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：永久磁石補助突極形同期機の要素研究を格段に進展させることによって、研究段階から実用化までの間のいわゆるデスバレーを解消していくことを目的とした。(1)永久磁石や磁極片の形状を最適化し、出力最大となる構造を見出した。永久磁石補助突極形同期機の性能を限界まで向上するための設計指針を見出した。(2)インバータ駆動による弱め界磁運転時における永久磁石の効果と健全性を調査した。通常運転時だけでなく弱め界磁運転時においても永久磁石によるトルク向上効果があることがわかった。インバータ駆動による弱め界磁運転時の測定設備を構築した。永久磁石の効果と健全性を確認できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose is to resolve the so-called "valley of death" between the research and the practical application by significantly developing the study on the technology elements of permanent-magnet-assisted salient-pole synchronous machines. (1) The machine structure in which the output power is maximized has been found by optimizing the shapes of the permanent magnets and the pole shoes. A design guide to improve the performance of the permanent-magnet-assisted machine to the fullest potential has been found. (2) The effectiveness and healthiness of the permanent magnets under field-weakening conditions driven by inverters are examined. The effect of increasing the torque by the permanent magnets exists not only under normal conditions but under field-weakening conditions. The experimental setup to perform measurements under field-weakening conditions driven by inverters has been built. The effectiveness and healthiness of the permanent magnets have been confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電気機器

キーワード：同期機 永久磁石 出力密度 有限要素法 不可逆減磁 インバータ 弱め界磁 省資源

1. 研究開始当初の背景

突極形同期機は、社会インフラにおいて広く用いられている重要な電気・機械エネルギー変換機器である。本機においてエネルギー変換効率の向上や、機器体格の小形化が実現できれば、社会的に大きな省エネルギー・省資源効果が得られる。

これら突極形同期機の問題点に、磁極の磁気飽和がある。磁気飽和が強くなると効率の低下を招く。また、機器の端子電圧や出力が制限される。逆に磁気飽和を緩和しようとすると、機器体格が大形化して使用材料の増加を招く。

この問題に対する解決策として、新構造の突極形同期機である永久磁石補助突極形同期機(PMaSM)が提案されている。これまでの突極形同期機(従来機, FWSM)と異なり、隣接する磁極端の間に永久磁石(PM)が追加されている。PMの効果によって磁極の磁気飽和を低減できるため、機器体格を変えずに端子電圧や出力を増やすことができる。あるいは小形化や、効率向上ができる。

本機が市場に普及すれば、社会インフラにおける省エネルギー・省資源に貢献でき、波及効果が大きい。また、本機のPMは磁気飽和低減という過去に類を見ない新規な概念の効果のために使用されている。この新概念はPMaSMに限らず、各種の電気機器、磁気応用機器に対して応用できる可能性があり、大きな波及効果が期待できる。

しかし、これまでのPMaSMの研究は数ケースの寸法例を対象にした基礎的検討に留まっていた。PMaSMを製品化するためには、今後も多くの要素技術的検討を重ねる必要がある。すなわち、研究段階から実用化までの間のいわゆるデスパレーを解消していく必要がある。これによって、PMaSMおよび、漏れ磁束が通る位置に配置されたPMに対する技術的・学術的な理解が一層深まるとともに、PMaSMの実用化に近づくことができる。

2. 研究の目的

研究の全体構想は、PMaSMの要素研究を格段に発展させることによって前記のデスパレーを解消することである。

研究開始当初の具体的な目的は次のとおりである。

(1) PMや磁極片の形状を最適化し、出力最大となる構造を見出す。

(2) 突発短絡時のPMの不可逆減磁について、不可逆減磁防止策を立案するとともに実現象を把握する。

(3) インバータ駆動による弱め界磁運転時におけるPMの効果と問題点を把握する。

なお、いずれもネオジム磁石のほかにフェライト磁石採用時についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 有限要素解析(FEA)を用いて、過去に試作済みのPMaSM実機(旧PMaSM)の形状

を元にして、そのPM形状および、それに隣接する磁極端の形状を手作業で変更することによって、出力をできるだけ大きくできる形状を考案した。これを第1弾のPMaSM実機(高出力PMaSM)として試作して、性能評価した。

さらに、この評価結果を踏まえ、FEAによる自動最適化を実施した。人手による試行錯誤では思いつかない形状で、さらなる出力向上が見込める構造が得られた。これを第2弾PMaSM実機(最適化PMaSM)として試作した。この測定を実施し、出力が更に向上するかどうかを検証した。

(2) 突発短絡時のPMの不可逆減磁防止策を立案するための事前研究を実施した。すなわち、過去のFEAで、機器形状によっては突発短絡事故時にPMが不可逆減磁することが明らかになっていた。しかし、このFEAの妥当性を実機検証していなかった。このため、FEAと同条件の実測を実施して解析精度を評価した。

ただし、もし本実測でPMaSM内部のPMが不可逆減磁に至ると、試作機が性能を失って他の各種実験が実施不能となる。これを避けるために低電圧の試験のみ実施した。すなわち、不可逆減磁が起きるような高電圧の試験は、試作機が壊れても差し支えない程に各種測定を実施し尽くした後に実施することとした。本研究期間内に各種測定を実施し尽くすことができなかったため、この高電圧試験は今後の課題とした。突発短絡時のPMの不可逆減磁防止策を立案する研究は、さらにその後実施する。

(3) まず、FEAによる弱め界磁運転時の特性解析を実施した。次に、インバータ駆動による弱め界磁運転時の測定を実現するための測定設備を構築した。これによって従来機およびPMaSMの測定を試みた。これらFEAと測定によってインバータ運転や弱め界磁運転によるPMの効果および健全性を調査した。

(4) 研究開始当初の目的に追加して、過渡状態を考慮したPMaSMの設計法の構築にも取り組んだ。具体的には過渡状態の特性を計算できる磁気回路計算法を新規に構築した。この計算結果を実機試験結果と比べることにより、磁気回路の精度を検証した。

(5) これら(1)~(4)はネオジム磁石の場合を対象とした。フェライト磁石の場合については、時間の都合により、実施しなかった。今後実施予定である。

4. 研究成果

(1) FEAによって寸法決定した第1弾の高出力PMaSMの断面を図1に示す。本機の測定結果を踏まえ、最適化を実施して寸法決定し

た第2弾の最適化 PMA SM の断面を図2に、写真を図3に示す。

FEA と測定によって、両機の性能評価を実施した。同体格の旧 PMA SM および、PM を有しない従来機と比べて、両試作機の定格負荷時の出力密度がそれぞれ約 1.1 倍および 1.4 倍向上した。PMA SM の高出力化を達成できた。同一電圧時の効率もわずかに向上した(図4)。

最適化 PMA SM は高出力 PMA SM と同等の出力と効率になった。ただし、遅れ力率の高負荷時においては、前者が後者に比べて界磁起磁力をより低減できることがわかった(図5)。定格電圧を越える高飽和領域においては、前者が後者に比べて電圧を向上させることがわかった(図6)。PMA SM の性能を限界まで向上するための設計指針を見出すことができた。

FEA によって、PMA SM 内部の現象も明らかにした。両試作機は旧 PMA SM に比べて磁極胴部の磁気飽和がさらに緩和されていることを確認した。

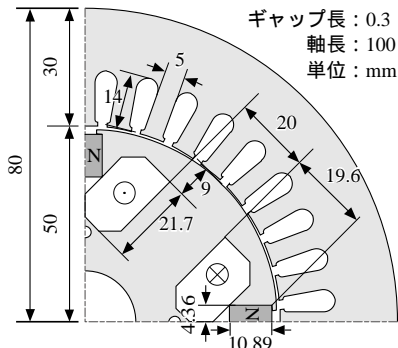


図1 第1弾の高出力 PMA SM 試作機の 1/4 断面

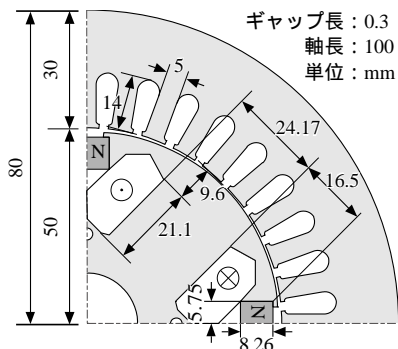


図2 第2弾の最適化 PMA SM 試作機の 1/4 断面

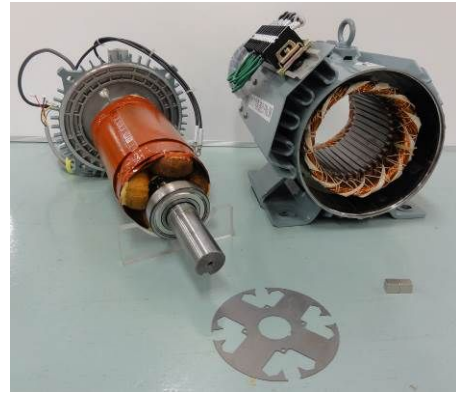


図3 第2弾の最適化 PMA SM 試作機の写真

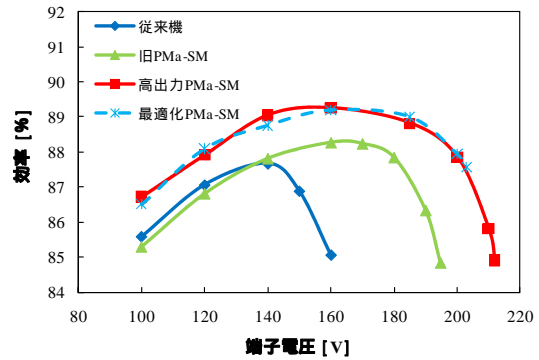


図4 効率の測定結果(定格電流, 力率1)

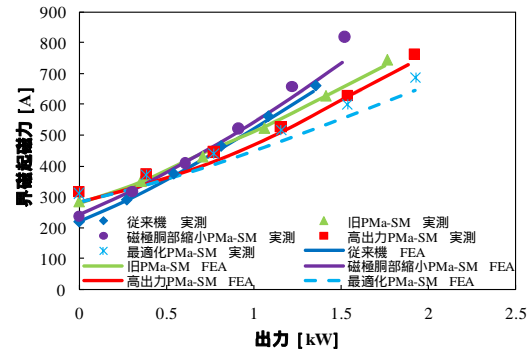


図5 界磁起磁力の FEA・測定結果(定格電圧, 遅れ力率0.8)

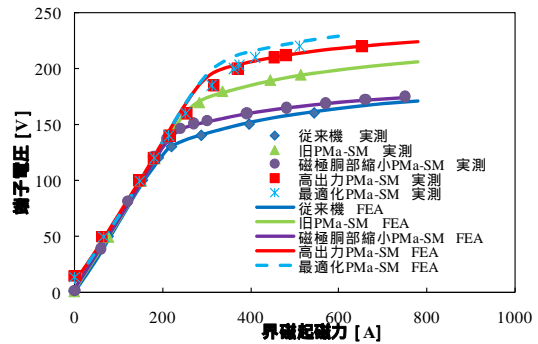


図6 無負荷飽和曲線の FEA・測定結果

(2) FEA による PM の不可逆減磁解析の精度を、旧 PMA SM の実測によって検証した。この結果、解析の精度が非常に高いことを明ら

かにした(図7)。不可逆減磁防止策を立案するための解析が妥当であることを確認できた。

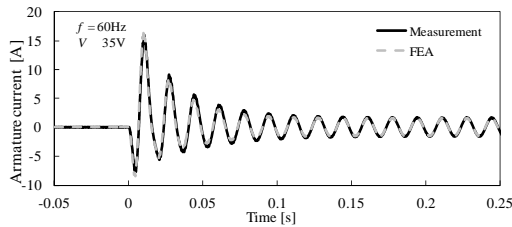


図7 三相突発短絡時の相電流の解析・測定結果

(3) まず、FEAによって従来機(FWSM)および高出力 PMSM の弱め界磁運転時の特性解析を実施した。図8のように、同一の電流位相角で比較すると、低速の通常運転時だけでなく、高速の弱め界磁運転時においてもPMによるトルク向上効果があることがわかった。図9のように、低速の最大トルク制御時には PMSM のトルクが従来機よりも35%大きいことがわかった。これはPMの効果による。高速の弱め界磁制御時には両機のトルクが同一である。これは、両機の最大端子電圧を同一としたためである。

次に、図10に示すインバータ駆動による弱め界磁運転時の測定設備を構築した。制御システムには、Myway プラス社パワエレ用デジタル制御システム PE-Expert3を用いた。駆動アルゴリズムを記したベクトル制御プログラムは自作した。指定した回転速度と電流位相角で駆動できるようにした。

これを用いて、測定を試みた。回転速度と電流位相角を広く変えて、幅広い負荷条件下で高出力 PMSM を駆動させることができた。定格速度 1800min^{-1} を越えない運転条件下での測定が、問題なく実施できた。インバータ駆動によってもPMの不可逆減磁の問題が生じないことを実証した。PMSMのFEAと測定の結果は、定格時よりも大幅に磁気飽和の強い領域を除いて、良く一致した(図8)。インバータ駆動時においても FEA の計算精度が良好であることがわかった。

以上のことから、インバータ運転や弱め界磁運転による PMSM の健全性や有用性を確認できた。

ただし、従来機については、試運転時に定格速度の約2倍まで増速させたところ、遠心力によって界磁巻線が損傷したため、以後試験不能となった。その後、損傷を修理済みであるため、従来機の測定を進める予定である。定格速度を越える運転条件下での測定も実施予定である。

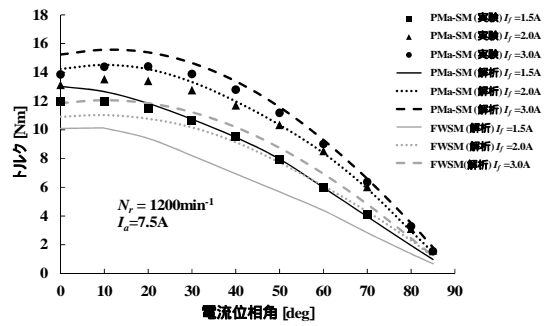


図8 電流位相角によるトルク変化の FEA・測定結果(電流位相角が大きい領域が弱め界磁運転時に相当。)

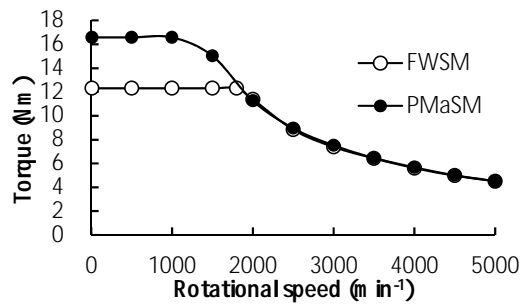


図9 可変速運転時のトルクの FEA 結果

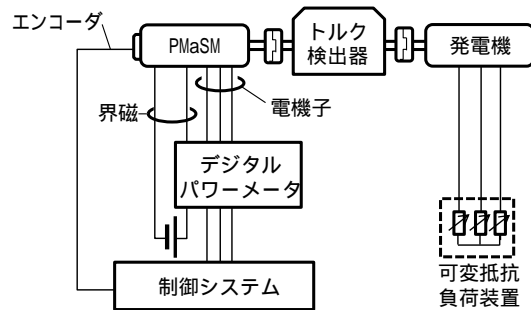


図10 構築したインバータ駆動・測定設備

(4) 過渡状態の磁気回路計算法を PSpice によって構築した。この計算結果を旧 PMSM の試験結果と比べることにより、磁気回路の計算精度が高いことを実証した(図11)。FEAでは8時間かかる解析が、磁気回路では7分で実施できた。計算時間を大幅に短縮できた。磁気回路による過渡状態の高速・高精度設計計算を実現した。

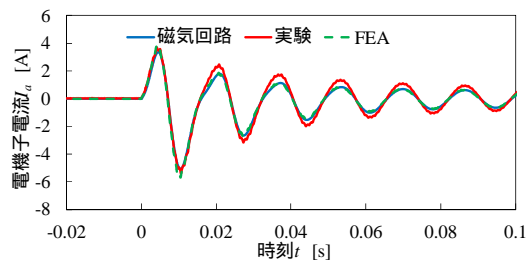


図11 三相突発短絡時の相電流の磁気回路計算結果と FEA・測定結果

(5) 以上(1)~(4)によって, PMaSM および, 漏れ磁束が通る位置に配置されたPM に対する技術的・学術的な理解が一層深まるとともに, 設計技術が向上した。PMaSM の実用化に近づくことができた。今後も引き続き要素研究を重ねていき, いわゆるデスバレーの解消を続けていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Katsumi Yamazaki, Shuichi Tamiya, Kazuo Shima, Tadashi Fukami, Masato Sato, Output Maximization of Salient-Pole Synchronous Machines by Using Additional Permanent Magnets, IEEE Journal of Industry Applications, 査読有, Vol. 2, No. 6, 2013, pp. 276-282

〔学会発表〕(計10件)

Katsumi Yamazaki, Kazuya Utsuno, Kazuo Shima, Tadashi Fukami and Masato Sato, Rotor Shape Optimization for Output Maximization of Permanent Magnet Assisted Synchronous Machines, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014年9月14-18日, Pittsburgh, USA

山崎克巳・宇都野和哉・島 和男・深見 正・佐藤真人, 永久磁石補助突極形同期機における出力最大化のための形状最適化と実機検証, 電気学会全国大会, 2014年3月20日, 松山

山崎克巳, 宇都野和哉, 島 和男, 深見 正, 紺谷貞臣, 山田知徳, 可変速永久磁石補助突極形同期機の電磁界解析と実機検証, 電気学会回轉機研究会, 2013年11月13日, 仙台

紺谷貞臣・山田知徳・島 和男・深見 正・山崎克巳, 永久磁石補助突極形同期機の電動機駆動試験, 電気関係学会北陸支部連合大会, 2013年9月22日, 金沢

山崎克巳・民谷周一・島 和男・深見 正・佐藤真人, 永久磁石補助突極形同期機における出力最大化のための形状最適化に関する検討, 電気学会全国大会, 2013年3月21日, 名古屋

Katsumi Yamazaki, Shuichi Tamiya, Kazuo Shima, Tadashi Fukami, and Masato Sato, Output Maximization of Salient-Pole Synchronous Machines by Using Additional Permanent Magnets, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2012年10月23日, 札幌

佐藤真人・島 和男・深見 正, 永久磁石補助突極形同期機の減磁解析の精度評価, 電気学会産業応用部門大会, 2012年8月21日, 千葉

山崎克巳・宇都野和哉・島 和男・深見 正, 永久磁石補助突極形同期機の可変速電動機への応用に関する検討, 電気学会回轉機研究

会, 2012年8月7日, 大阪

山崎克巳・民谷周一・島 和男・深見 正, 永久磁石補助突極形同期機における出力向上のための新設計と実機検証, 電気学会回轉機研究会, 2012年7月19日, 東京

山崎克巳・民谷周一・島 和男・深見 正, 永久磁石補助突極形同期機における出力向上のための新設計に関する検討, 電気学会全国大会, 2012年3月23日, 広島

6. 研究組織

(1)研究代表者

島 和男 (SHIMA, Kazuo)
金沢工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20410285

(2)連携研究者

深見 正 (FUKAMI, Tadashi)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号: 60247434

山崎 克巳 (YAMAZAKI, Katsumi)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号: 70246015