

平成 30 年 7 月 31 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420254

研究課題名(和文)塊状磁極同期機に生じる表面損失の原理解明と損失低減対策

研究課題名(英文)Analysis and Reduction of Surface Losses in Solid Pole Synchronous Machines

研究代表者

島 和男 (Shima, Kazuo)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：20410285

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)：本研究では、塊状磁極同期機のグループによる表面損失の低減原理を解明するために、1.5 kVAの実験機を製作し、発電モードにおける特性を実験と有限要素解析により調べた。また、グループの効果をより明確に把握するため、その特性を、同一体格の2台の同期機(グループなし塊状磁極同期機及びグループなし積層磁極同期機)のものと同一出力の下で比較した。その結果、次のことがわかった。グループを施すことにより、1)塊状磁極の表面損失が低減できる。2)界磁電流の増加と負荷角が低下する。3)磁極の磁気飽和が生じやすくなる。

研究成果の概要(英文)：In this study, to clarify the principle of reducing the surface losses by grooves in solid-pole synchronous machines, a 1.5-kVA prototype machine was built, and its characteristics in a generator mode were investigated through experiments and finite element analysis (FEA). In addition, to more clearly grasp the effect of the grooves, its characteristics were compared under the same output power with those of two synchronous machines (ungrooved solid-pole synchronous machine and ungrooved laminated-pole synchronous machine) of the same size. The experimental and FEA results showed the following. By adding the grooves in the solid poles, 1) the surface losses can be reduced, 2) the field current is increased and the load angle is decreased, and 3) the magnetic saturation tends to occur in the field poles.

研究分野：工学

キーワード：電気機器 回転機 同期機 損失 塊状鉄心

### 1. 研究開始当初の背景

塊状磁極同期機は、回転子の磁極が鉄の塊でできており一体構造になっている。そのため、低コストで製作でき、熱及び機械的強度が高い。また、渦電流により始動トルクを発生することができる。塊状磁極同期機は、これらの利点によりタービン発電機、自動車用オルタネータ、圧延機用の電動機等に用いられている<sup>(1)</sup>。しかし、塊状磁極同期機は、定常運転のとき磁極に渦電流損失を主成分とする表面損失が発生する。この損失により、効率の低下や磁極が過熱するといった懸念要素がある。そのため設計段階において、解析による表面損失の計算精度の向上や表面損失を抑制する構造の工夫が望まれている<sup>(2)</sup>。先行研究では、表面損失を抑制する構造の工夫として、磁極表面にグループを施す方法を採用している<sup>(3)</sup>。現状では、環状試料(塊状磁極の近似モデル)にグループ(溝)を施すことで、表面損失を抑制できることがわかっている<sup>(4)</sup>。しかし、実験機による検証実験ができていない。また、グループによる表面損失低減効果に関する文献が少なく、原理解明が不十分と見受けられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、グループ(磁極の表面に施した溝)による塊状磁極同期機の表面損失低減原理の解明と実機検証を目的とした。

### 3. 研究の方法

2章で示した目的を達成するために、本研究では、グループ付き塊状磁極同期機を試作した。また、本機の発電機動作を例にとり、表面損失の諸特性を測定した。さらに、有限要素解析(FEA: Finite Element Analysis)を用いて、グループを施した磁極の現象分析を行った。

### 4. 研究成果

#### 4.1 表面損失の発生原理

無負荷時における塊状磁極同期機の表面損失発生原理について述べる。Fig. 1に磁極表面における渦電流通路、Fig. 2に磁極表面における磁束分布を示す。Fig. 1に示すように界磁巻線に直流電流を流すと、界磁磁束が発生する。磁極が回転すると、Fig. 2のように固定子スロットの凹凸により磁束が通りやすい部分と通りにくい部分ができ、界磁磁束に重畳して脈動磁束が発生する。この磁束を妨げるように磁極表面に渦電流が生じる。この電流による損失を主成分とする電力損失(表面損失)が発生する<sup>(5)(6)</sup>。

#### 4.2 グループによる表面損失の低減

グループによる表面損失低減効果について述べる。ただし現状では、グループによる表面損失低減効果の原理解明には至っていない。そのため、先行研究の結果<sup>(4)</sup>をもとに原理を推測し述べる。Fig. 3にグループを施した塊状磁極の構造を、Fig. 4にグループを施した塊状磁極の軸方向断面を示す。表面損失の対策と

して、Fig. 3のように磁極表面にグループを施す方法がある<sup>(3)</sup>。周方向にグループを施すことで、Fig. 4のように磁極表面近傍に生じる渦電流の通路が長くなり、電気的抵抗が増大するため、表面損失が低減されると考えられる<sup>(4)</sup>。

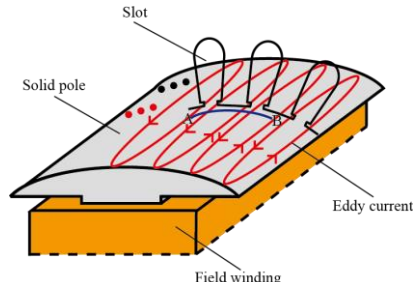


Fig. 1. Eddy currents in a solid-pole face.

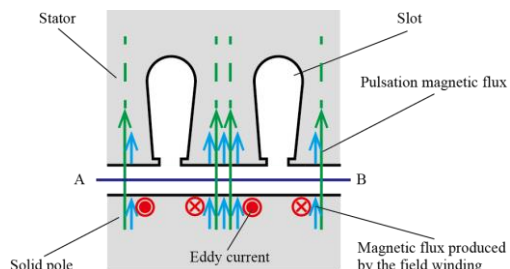


Fig. 2. Magnetic flux distributions in the solid-pole face of Fig. 1.

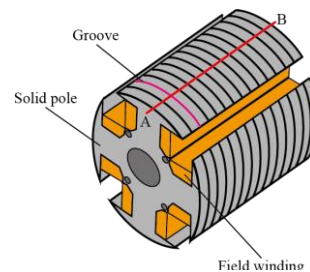


Fig. 3. Structure of a grooved solid-pole rotor.

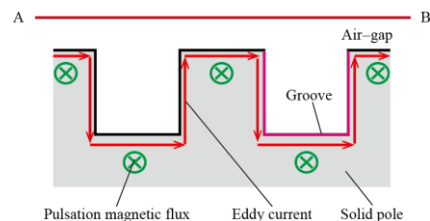


Fig. 4. Pulsation magnetic fluxes and eddy currents in the grooved solid-pole rotor of Fig. 3.

#### 4.3 検討対象機の仕様と構造

本研究の検討対象機として、グループ付き塊状磁極同期機(試作機)を製作した。この試作機は、表面損失に付随する電磁気現象を解明する目的に特化して設計した突極形同期機である。Fig. 5に試作機の1/4前断面を示す。試作機の仕様は、極数4、スロット数36、容量1.5 kVA、定格電圧115 V、定格電流7.5 A、

回転速度  $1800 \text{ min}^{-1}$ , 磁極の軸方向長さ  $100 \text{ mm}$  である。また Fig. 5 に示すように、原理解明を容易にするため、 $0.4 \text{ mm}$  均一のギャップ長とした。Fig. 6 に試作機の回転子、Fig. 7 にグループの寸法を示す。Fig. 6, Fig. 7 に示すように磁極表面の周方向にグループを等間隔で施した。グループの寸法は、グループの影響を比較しやすくするため、先行研究の FEA の結果をもとに、表面損失の低減割合が極端に大きいものを採用した<sup>(7)</sup>。

ベンチマークとして、グループ無し塊状磁極同期機とグループ無し積層磁極同期機を試作した。ベンチマークと試作機の仕様及び体格は同一である。また、固定子は各機ともに同じものを流用し、回転子のみ入れ替えた<sup>(5)</sup>。これは、表面損失を同条件で比較するためである。

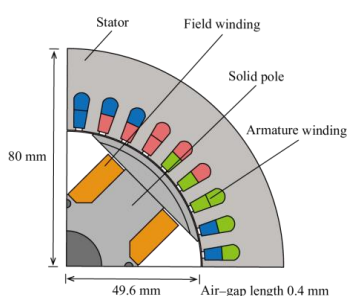


Fig. 5. One-fourth cross-section of the prototype machine.

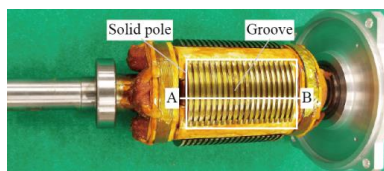


Fig. 6. Grooved solid-pole rotor used for the prototype machine.

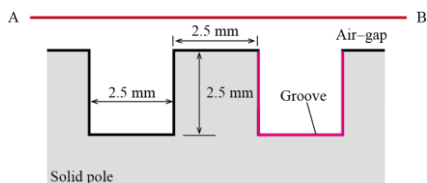


Fig. 7. Dimensions of the grooves in Fig. 6.

#### 4.4 表面損失の測定方法

##### 4.4.1 表面損失測定実験

実験による表面損失測定について述べる。塊状磁極同期機の損失から積層磁極同期機の損失の差を表面損失と仮定した<sup>(5)</sup>。Fig. 8 に実験回路を示す。実験では、各機の無負荷時と負荷時における出力  $P_{out}$ , 入力  $P_{in}$ , 機械損  $P_m$ , 電機子銅損  $P_a$ , 界磁銅損  $P_f$  を測定した。(1)式から各機の鉄損  $P_i$  と漂遊負荷損  $P_s$  を算出した<sup>(4)</sup>。塊状磁極の場合、 $P_i$  と  $P_s$  に表面損失が含まれる。一方で、積層磁極の場合、表面損失はほとんど含まれない。

$$P_i + P_s = (P_{in} - P_{out}) - (P_m + P_a + P_f) \quad (1)$$

無負荷時は、Fig. 8 の総合負荷装置 (シャント抵抗を含む) を開放した。負荷時は、Fig. 8 のように電機子端子 U, V, W にパワーメータを通して総合負荷装置を接続し、界磁電流と負荷を調節して各機を定格電圧  $115 \text{ V}$ , 電機子電流  $0 \sim 7.5 \text{ A}$ , 力率  $1.0$  となるようにした。電機子巻線の温度上昇による  $P_a$  の増加を防ぐために電機子巻線が十分に冷えている状態で測定を行った。また、機内の磁束状態を調べるため、PE-Expert 3 をデジタル計測・演算表示システムとして、エンコーダの信号, U, V 相の電機子電圧  $V_a$  及び電機子電流  $I_a$  を取り込み、PE-Expert 3 内部で  $dq$  変換を行い負荷角と電流位相角を測定した。

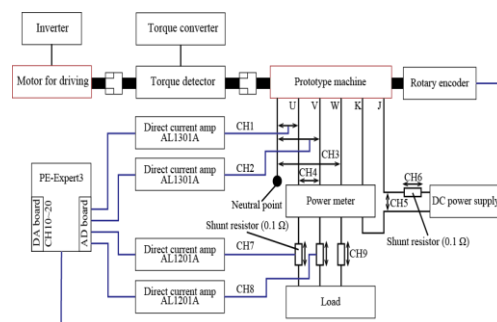


Fig. 8. Experimental setup.

##### 4.4.2 表面損失解析方法

FEA による表面損失の解析について述べる。FEA による磁極の現象分析を目的として、試作機とグループ無し塊状磁極同期機の無負荷時と負荷時を解析し、回転子の磁極頭部の渦電流損失を表面損失と仮定した。試作機は、グループを施しているため、3次元解析を行い<sup>(7)</sup>、グループ無し塊状磁極同期機は時間短縮のため、2次元解析を行った。しかし、グループ無し積層磁極同期機の解析は、時間の都合上実施できなかった。

試作した塊状磁極の磁極材料 (SS400 材) と同じロットで製作した棒状試料と環状試料を用いて、解析に用いる磁極の導電率と磁気特性を算出した。磁極の導電率は、 $\sigma = 5.034 \times 10^6 \text{ S/m}$  とした。磁気特性は、初期磁化曲線を解析に用いた。今回の解析では、表面損失の解析精度を評価するためではなく、現象分析が目的であるため、マイナーループとヒステリシス損は無視した<sup>(8)</sup>。

#### 4.5 表面損失に関連する諸特性の結果と考察

##### 4.5.1 無負荷時の特性

無負荷時における特性について述べる。Fig. 9 に無負荷飽和曲線、Fig. 10 に三相短絡曲線を示す。Fig. 9 では、試作機とベンチマークの定格電圧  $115 \text{ V}$  における界磁電流が異なる。これは、塊状磁極と積層磁極の回転子材料が異なるためである<sup>(5)</sup>。また、試作機とグループ無し塊状磁極同期機の界磁電流が異なるのは、

磁極にグループを施したことによる影響だと考えられる。Fig. 10 では、試作機とベンチマークの短絡時の特性はほとんど一致している。

無負荷飽和曲線と三相短絡曲線から試作機とベンチマークの同期リアクタンス  $X_s$  を(2)式から算出し、磁極の飽和を調査した。 $V_n$  は定格電圧、 $I_s$  は短絡電流である。

$$X_s = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_s} \quad (2)$$

Fig. 11 に  $X_s$  を示す。Fig. 11 に示すように試作機の  $X_s$  がベンチマークに比べて低下している。これにより、グループ凸部に磁気飽和が生じやすくなったと考えられる。

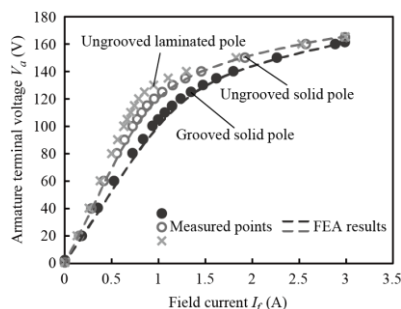


Fig. 9. Open-circuit characteristics.

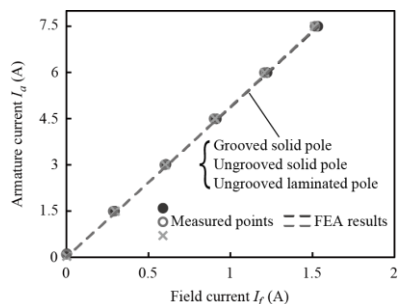


Fig. 10. Short-circuit characteristics.

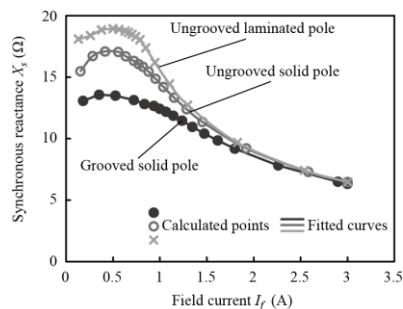


Fig. 11. Synchronous reactances.

#### 4.5.2 負荷時の特性

負荷時における特性について述べる。Fig. 12 に試作機とベンチマークの  $P_i$  と  $P_s$  の比較を、Fig. 13 に FEA による表面損失の比較を示す。Fig. 12 では、表面損失がほとんど発生しないグループ無し積層磁極同期機を基準とすると、試作機の  $P_i$  と  $P_s$  は、電機子電流が増大するに連れてグループ無し塊状磁極同期機の  $P_i$  と  $P_s$  より小さくなっている。また Fig. 13 で

も、試作機の表面損失がグループ無し塊状磁極同期機の表面損失より小さくなっている。これにより、グループを施すことで、表面損失が低減できることを確認できた。

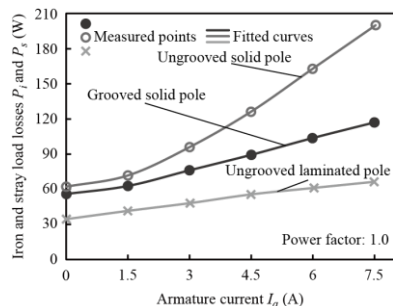


Fig. 12. Iron and stray load losses.

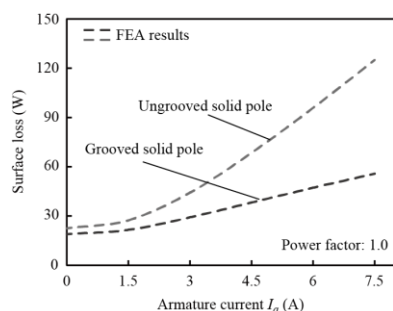


Fig. 13. Surface losses.

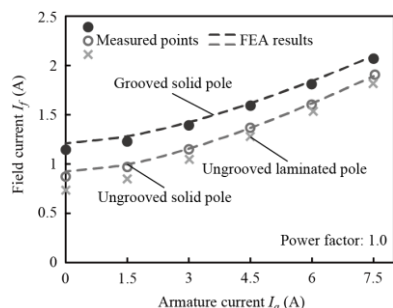


Fig. 14. Compounding curves.

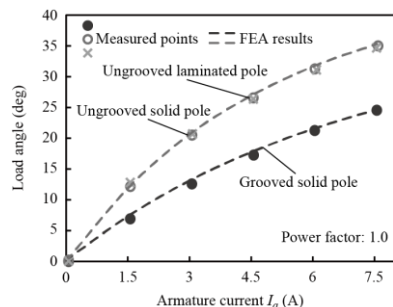


Fig. 15. Load angles.

Fig. 14 に界磁調整曲線を、Fig. 15 に負荷角を示す。表面損失が低減するとともに、試作機の界磁電流が増加し、負荷角が低下している。これらは、グループ凸部、磁極端の磁気飽和による影響だと考えられる。また、Fig. 16 に効率特性を示す。Fig. 16 からわかるようにグ



ループを施すことで、グループ無し塊状磁極同期機より効率の低下は見られない。

Fig. 17, Fig. 18 に FEA による試作機の磁極表面近傍の磁束密度分布と渦電流密度分布を示す。Fig. 17 では、電機子反作用により磁極片に磁気飽和が生じている。また、グループ凸部に磁束が集中している。これにより、磁極鉄心に磁気飽和が生じやすくなったと考えられる。Fig. 18 では、グループ凹部の磁極表面における渦電流密度が小さくなっている。これは、渦電流の表皮深さが小さくなったためと考えられる。

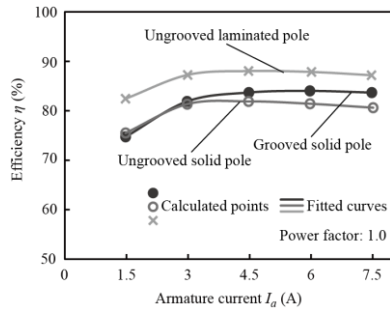


Fig. 16. Efficiencies.

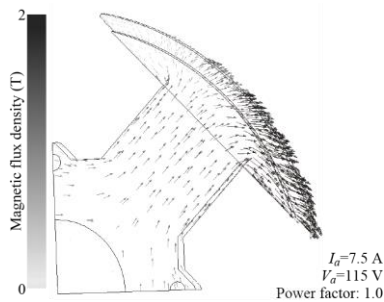


Fig. 17. Magnetic flux density distribution in the grooved solid pole.

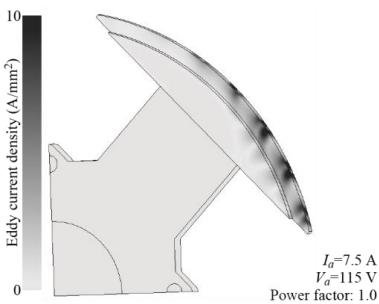


Fig. 18. Eddy current density distribution in the grooved solid pole.

#### 4.6 まとめ

以上、グループを施した試作機とグループを施していない2機のベンチマーク（塊状磁極同期機、積層磁極同期機）を同一出力下で比較して、次のことがわかった。

- (1) グループを施すことで、表面損失が低減できる。
- (2) グループを施しても効率の低下は見られない。

(3) 磁極が磁気飽和しやすくなり、界磁電流の増加と負荷角の低下が見られた。

今後の課題を下記に示す。

- (1) グループの寸法を変更させたときの特性を調査する必要がある。
- (2) 本検討で無視したマイナーループとヒステリシス損の影響を考慮した解析を行い、表面損失の計算精度を検証する必要がある。

#### 〈引用文献〉

- (1) 湧井真一・井出一正・小原木春雄・高橋身佳・宮川家導・八木恭臣：「タービン発電機におけるサイリスタ始動時の電磁気的特性の考察」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 115, No. 9, pp. 1140-1148 (1995-9)
- (2) 松本拓也：「修士学位論文 塊状鉄心環状試料の初期偏磁状態が葉面損失へ及ぼす影響およびグループを施した塊状磁極同期機の表面損失低減効果の検討」, 金沢工業大学, pp. 1-104 (2016-2)
- (3) 八木沢猛：「塊状鋼材交流磁気特性の一般的表示方法」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 107, No. 7, pp. 355-361 (1987-7)
- (4) 渡部宏也・島和男・深見正・花岡良一・高田新三：「グループ付き塊状磁極同期機の近似モデルにおける表面損失特性」, 電気学会産業応用部門大会, Y-110, p. 112 (2010-8)
- (5) 藤抜翔・松本拓也・島和男・深見正：「突極形塊状磁極同期機の負荷時表面損失の測定および現象分析」, 電気学会回転機研究会, RM-14-123, pp. 73-78 (2014-10)
- (6) 島和男・深見正・宮田健治・李燦・古川陽子：「偏磁下におけるマイナーループを考慮した塊状磁極鉄心渦電流解析」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門), Vol. 133, No. 2, pp. 231-239 (2013-2)
- (7) 城ノロ貴斗・中村文哉：「プロジェクトデザインⅢ 塊状磁極同期機の負荷時表面損失測定およびグループ付き塊状磁極の表面損失解析」, 金沢工業大学, pp. 18-27 (2015-2)
- (8) 小林伸幸・島和男・深見正・宮田健治・李燦・古川陽子：「ヒステリシスを考慮したグループ付き塊状鉄心の偏磁状態における表面損失解析」, 電気学会回転機研究会, RM-13-120, pp. 77-82 (2013-11)

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

- ① 藤抜翔・松本拓也・島和男・深見正：「突極形塊状磁極同期機の負荷時表面損失の測定および現象分析」, 電気学会回転機研究会, RM-14-123, pp. 73-78 (2014-

10)

- ② K. Shima, T. Fujinuki, T. Matsumoto, and T. Fukami, "Measurement of Surface Losses in Solid Poles of Synchronous Machines Under Load Conditions," *Digest of the IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG 2015*, Beijing, China (2015-5)
- ③ 森岡俊弥・島 和男・深見 正：「表面損失現象解明のためのグループ付き塊状磁極同期機の試作」，電気学会全国大会，Vol. 5, No. 5-055, pp. 96 (2017-3)

## 6. 研究組織

研究代表者

島 和男 (Shima, Kazuo)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：20410285