

博士論文の概要

(2018 年 11 月 12 日 提出)

論文題目 埋込磁石同期モータ (IPMSM) の磁石配置
および配向着磁と高温減磁特性向上に関する研究

指導教員

本田 幸夫



大学院 工学研究科
博士後期課程

生体医工学 専攻

申請者氏名

西山 典禎



大阪工業大学大学院

第1章 緒 論

持続可能な社会実現へ向けて SDGs (Sustainable Development Goals) が 2015 年 9 月の国連サミットで採択され、地球環境エネルギー問題への対応は喫緊の課題である。特に消費電力総量 9,996 億 kWh の 57%以上を占めているモータの小型高性能化の要求が強くなっている。一方、モータを搭載する機器の小型化も進み、モータが使用される温度環境が高温化し、高温環境下でも小型高効率なモータへの要求が厳しくなっている。

本研究では、省資源設計の観点から巻線方式は銅の使用量を大幅に低減できる集中巻とし、高効率な観点からマグネットトルクとリラクタンストルクの両方を有効利用できる埋め込み磁石同期モータ (IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) において、磁石配置および配向着磁による高温減磁耐力の向上により、 180°C の高温環境下で減磁率 1%での減磁耐力を向上するモータ構成について研究した成果をまとめている。

第2章 集中巻 IPMSM の減磁耐力向上策の基礎検討

IPMSM と表面磁石型同期モータ (SPMSM: Surface Permanent Magnet Synchronous Motor) の減磁耐力比較、集中巻と分布巻の減磁耐力比較から、高温環境下で使用されるモータには集中巻 IPMSM が適しているが、集中巻 IPMSM の高減磁耐力化という技術課題を解決する方策を見つけ出すことが最も重要な研究課題である。そこで、集中巻 IPMSM の減磁耐力向上策として、板厚方向に対して斜めに配向着磁をした永久磁石の減磁耐力に与える影響を検討することで解決策を探索した。(Fig. 1)。

パーミアンス係数 P_c を (1) 式で示す。板厚寸法 t_m 、幅寸法 W_m の板厚方向に平行配向の直方体磁石の P_c と、板厚方向に対して斜めに配向した平行四辺形磁石の P_c は同等で永久磁石の動作点も同等であるが、(2) 式で示した逆磁界ベクトル H_m が平行配向磁石に作用する逆磁界 H より小さく、着磁配向角 α が大きいと減磁耐力の向上が期待できることが分かった。

一方、集中巻モータは分布巻モータとは異なり、回転磁界が発生する際 N 極と S 極に対向するステータース数異なるため、負の d 軸電流の通電時に N 極と S 極の永久磁石へ作用する磁界が異なることを明らかにした。そこで、集中巻 IPMSM の減磁評価方法として、二相通電による減磁評価と三相通電による減磁評価方法を考案し、評価方法としての妥当性を明確にしている。

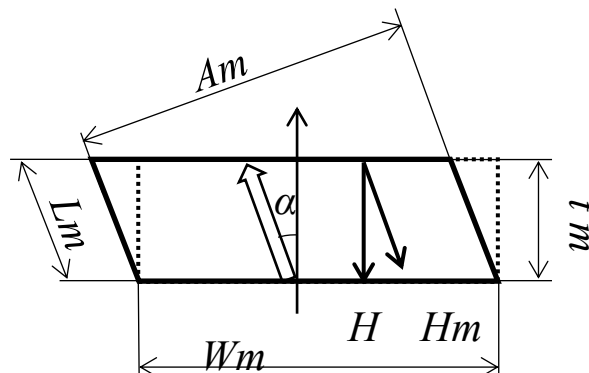


Fig. 1 Obliquely oriented magnetized magnet

$$P_C = \frac{L_m \cdot A_g}{A_m \cdot L_g} \cdot \frac{\sigma}{f} \dots\dots (1)$$

$$H_m = H \cdot \cos \alpha \dots\dots (2)$$

ここに、 L_m は磁化方向の磁石寸法である磁石長、 A_m は磁化方向に垂直な磁石寸法である磁石面積、 L_g はエアギャップ長、 A_g はエアギャップ断面積、 σ は漏れ係数、 f は起磁力損失係数、 H は逆磁界、 α は着磁配向角、 H_m は平行四辺形体磁石の磁化方向逆磁界成分。

第3章 磁石配置角と着磁配向角が減磁耐力に与える影響の検討

6極9スロット集中巻IPMSMにて永久磁石の配置と減磁耐力を調査した。永久磁石の体積が一定の条件下で着磁配向角 $\alpha=0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の斜め配向磁石をV字角 $Va=60^\circ \sim 180^\circ$ としたスポーク配置、V字配置、平板配置のモデルで、 $\alpha=0^\circ, Va=180^\circ$ の平板配置ロータに対する減磁改善率（1%減磁電流の低減率）とトルク比を検討した。 Va を小さくし永久磁石の埋め込み位置を深くすることで減磁耐力を向上できるがトルクは低下するため、トレードオフの関係になる（Fig. 2）。そこで、磁石体積が一定の条件下で斜め配向着磁磁石を用い磁石長 L_m の比を平板磁石の100%未満とし、永久磁石の幅が寸法 W_m を増加させれば、トルク同等で減磁耐力を10%改善し（Fig. 3）、減磁耐力とトルクのトレードオフの関係は改善できると考え電磁界解析と実機による検証を行った。

電磁界解析をした結果、平板配置ロータに対して、V字角 $Va=130^\circ$ のV字配置ロータでは1%減磁耐力が1.6倍になることを確認した。さらに、 $Va=130^\circ$ のV字配置ロータに $\alpha=20^\circ$ の斜め配向磁石を配置することで1%減磁耐力は2.5倍となるシミュレーション結果を得た。一方、試作評価ではV字配置ロータによる1%減磁耐力1.6倍を確認できたが、斜め配向磁石による減磁耐力向上は確認できなかった。そこで、平行四辺形体磁石端部の電磁界解析を詳細に検討し分析した。その結果、V字構成に起因する平行四辺形体の永久磁石端部の減磁界の影響が大きく保磁力

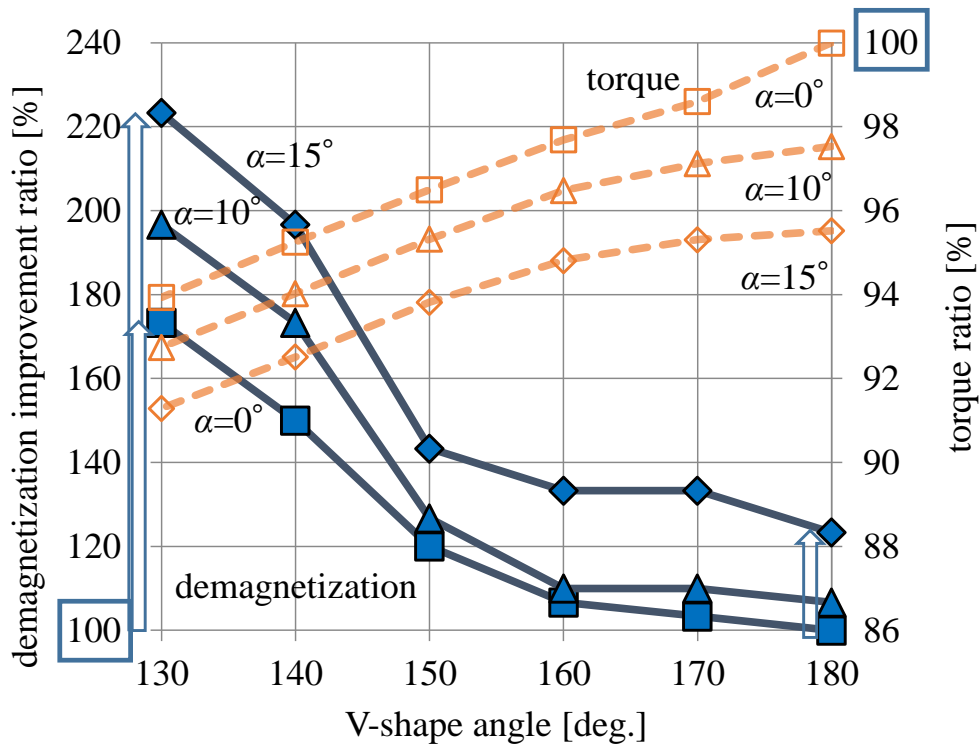


Fig. 2 V-shape angle vs. demagnetization improvement ratio and torque ratio

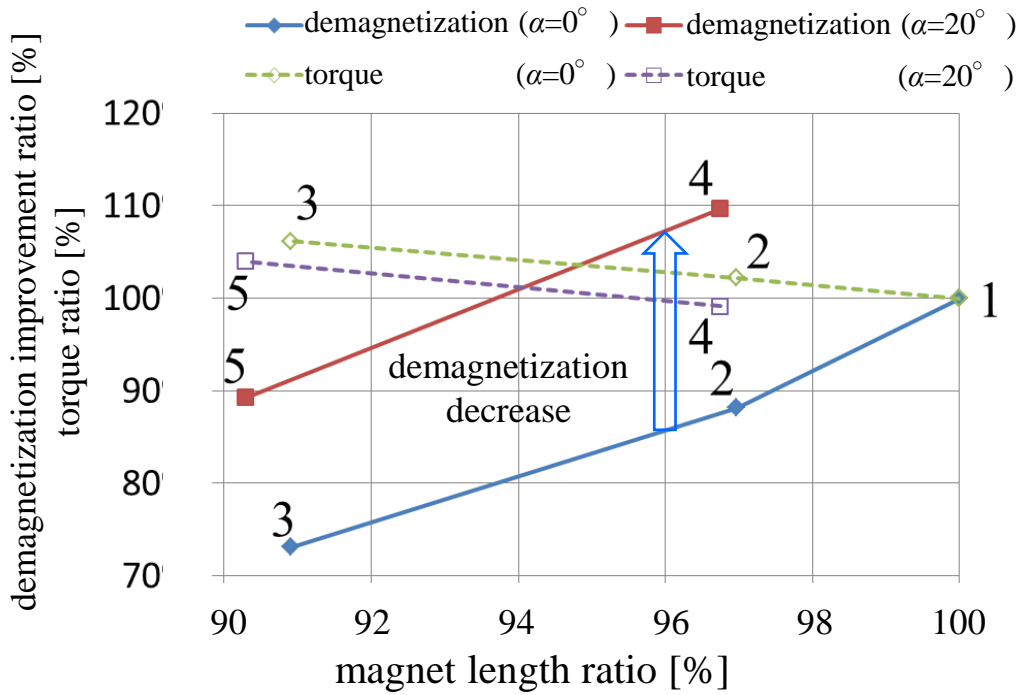


Fig. 3 Magnet length ratio vs. current ratio and torque ratio

が低下してしまうため、斜め配向着磁の効果は十分活かせないことが判明した。すなわち、V字磁石配置構成においては平行配向磁石に比べて磁石端部の保磁力が重要であることを明らかにした。解決策として、第5章でハルバッハ (Halbach) 磁石配列による磁石全体の保磁力向上の可能性を検討している。また、電流位相 $\beta=90^\circ$ のd軸電流のみでの減磁率に対して、弱め界磁制御駆動時の減磁率評価指標として電流位相減磁率 Cr を(3)式に定義して、斜め配向磁石は Cr が高く減磁に対する余裕度が高いことも明らかにしている。

$$Cr60 = Dr90 / Dr60 \dots\dots (3)$$

ここに、 $Dr90$ は電流位相 $\beta=90^\circ$ での減磁率、 $Dr60$ は電流位相 $\beta=60^\circ$ での減磁率である。

第4章 斜め配向磁石 IPMSM のロータ着磁の検討

永久磁石の板厚方向に対して斜めに配向した複数の永久磁石で極を構成する斜め配向磁石 IPMSM の着磁は実用化を考えると大きな課題である。そこで、着磁用巻線の配置と着磁電流の関係を電磁界解析にて実用的な着磁方法を検討した。従来の平行配向着磁磁石の IPMSM の着磁器と同様のロータ外周に配置された着磁器のティース間スロットに配置された巻線 coil 1 に加え、ロータコア内の磁石より回転軸側に着磁巻線 coil 2 を配置した着磁器による着磁を提案する。着磁配向角 $\alpha=20^\circ$ 、V字角 $Va=130^\circ$ のV字配置 IPMSM のロータで、着磁に必要なと想定する着磁配向角 $\alpha=20^\circ$ 方向の磁束密度成分 4.5T 以上に対して、coil 1 の通電のみでは 188kA 以上必要であるが、coil 1=125kA、coil 2=17kA の組み合わせにより着磁電流を 46kA 下げられることを明確にし、実用的な着磁方法の目処をつけることができた。

第5章 ハルバッハ配列 IPMSM による高トルク高減磁耐力モータの提案

ハルバッハ (Halbach) 磁石配列を応用し、ロータの回転軸端面に副磁石を配置した IPMSM を提案し、副磁石の突出量 C 、磁石空隙距離 D 、軸方向配向角 B より磁石配置と磁石配向による減磁影響を電磁界解析で検討した (Fig. 4)。

主磁石の着磁配向角 $\alpha=20^\circ$ 、副磁石の突出量 $C=0.5$ 、磁石空隙距離 $D=0.7\text{mm}$ 、軸方向着磁配向角 $B=-70^\circ$ とした試作機にて、従来の主磁石のみのロータの約 110% 磁石体積で減磁耐力 122% を確認した (Fig. 5)。主磁石のパーミアンス係数 P_c は 2.32 であり、磁石の板厚寸法 t_m を 110% とした従来設計の磁石のパーミアンス係数 $P_c=2.09$ よりも高く、減磁耐力が高いモータ構成を明らかにすることができた。

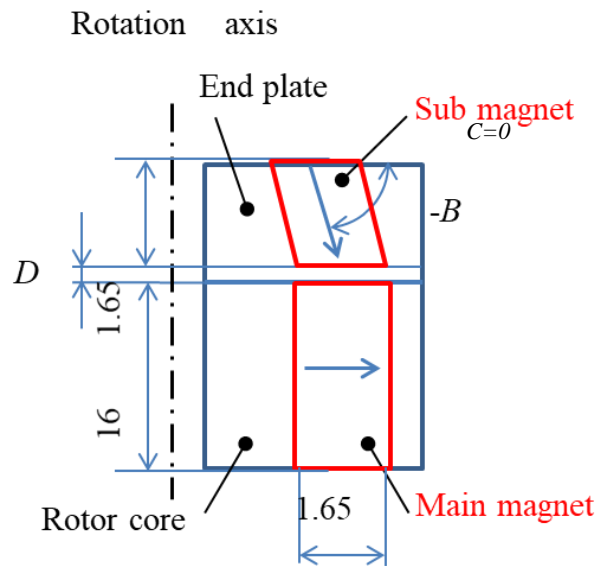


Fig. 4 Axial-orientation-magnetization angle B

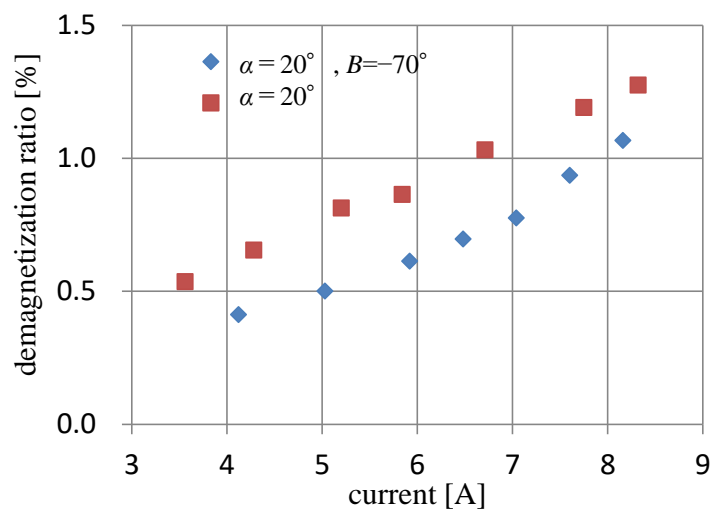


Fig. 5 Demagnetization ratio (experimental results)

第6章 結 論

- 1) 永久磁石の V 字配置では電磁界解析, 実験結果とも減磁耐力 1.6 倍の良好な結果が得られたが, 斜め配向磁石の効果は, 実測では確認することができなかった。その理由として, V 字配置の平行四辺形体永久磁石の角部の減磁界の影響が大きく保磁力が低下することが原因であることを明らかにした。
- 2) V字配置斜め配向磁石の着磁方法として, ロータコア内の磁石より回転軸側に着磁巻線coil 2 を配置した着磁器を提案し, coil 1=125kA, coil 2=17kA の組み合わせにより着磁電流を 46kA低減することが可能となり, 実用的な着磁器の目途をつけることができた。
- 3) ハルバツハ磁石配列を応用した IPMSM では, ロータ回転軸端面の副磁石の突出量 C を 0.5 ~0.75, 磁石空隙距離 D を 1.5mm 以下, 軸方向配向着磁角 B を -70° ~ -45° とすることで, 約 110%の磁石体積で減磁耐力 122%向上が可能となり, 加えてマグネットトルクに比例する誘起電圧も 102%向上させることが可能であることを示した。

今後の課題として, 斜め着磁配向磁石の量産性と代替工法, ロータコアのフラックスバリアの最適化, 低保磁力磁石への技術展開について, 引き続き研究開発を推進する。

以上