

ネオジム焼結磁石を用いたアキシアルギャップ PM モータの 磁石渦電流損に関する検討

宇佐美和明* 野口季彦（静岡大学）

Investigation on Magnet Eddy Current Loss of Double Axial Gap PM Motor Using Sintered Neodymium Magnet
Kazuaki Usami*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年、種々のモビリティの電動化が精力的に行われている中、モータの高効率化と小形化は必須の課題となっている。高効率化のために PM 同期モータが採用されることはもちろんのこと、さらなる高パワー密度化を目指して扁平形モータの開発も盛んに行われている。特に、扁平形モータはアキシアルギャップ構造を採用するとラジアルギャップ構造のモータと比較してトルク密度を大幅に改善することができる。アキシアルギャップモータの一般的なものは SPM モータであり、磁石渦電流損を低減するために、抵抗率の大きなフェライト磁石やボンド磁石を用いることが多い。しかし、これら磁石の残留磁束密度は小さく、大きな平均トルクを出力するには大きな電機子電流を流す必要があり、銅損増大が問題となる。また、集中巻ステータが採用されるため、トルクリプルも大きくなる問題がある。本論文ではこれらの改善法について検討を行った。

Fig. 1 に解析対象となるモータの 3D モデルを示す。

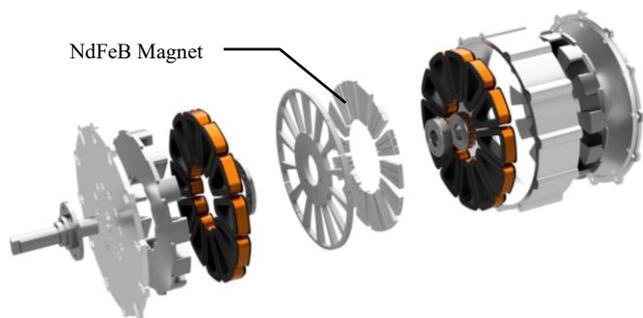


Fig. 1. Analysis model of double axial gap PM motor.

2. ネオジム焼結磁石の渦電流損

残留磁束密度の大きなネオジム焼結磁石を用いると平均トルクは大きくなるが、抵抗率が低いため渦電流が流れて発熱する。その結果、不可逆減磁に至ることもある。渦電流を低減するには磁石の分割が有効である。本論文では磁石の分割方向と、分割数に注目して渦電流の低減を検討した。Fig. 2 に磁石分割の様子を示す。

3. 形状最適化によるトルクリプルの低減

SPM モータは磁石がロータ表面にあるため、集中巻ステ

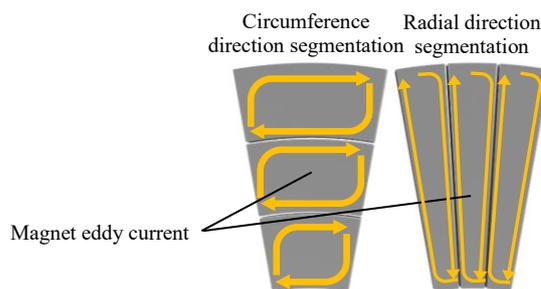


Fig. 2. Segmentation of sintered neodymium magnet.

ータも相まって空間的な磁束密度の高調波が含まれやすく、トルクリプルが大きくなる傾向が強い。ティース端にブリムをつけることでトルクリプルを低減することもできるが、磁性体に SMC 材を用いるため 1 回で成型することが困難になる。そのため、製造性を優先してフルオープンスロット構造のモデルで形状を最適化することによりトルクリプルの低減を図った。

4. 三次元電磁界解析の諸条件

電磁界解析ソフト JMAG Designer 18.1™ を用いて、マグネット形状の最適化を行うとともに、周方向と径方向に 1~10 分割し、磁石渦電流がどのように変化するかを調べた。なお、解析対象の磁気回路の直径は 100 mm、厚さは 36 mm で出力は 1kW 程度である。スロットコンビネーションは 12s14p である。q 軸のみに通電し、電流値は 4 Arms/phase で回転数は 3000 r/min とする。また、磁石温度は高温下での運転が想定されるため 100 °C で解析した。

5. 解析結果

<5.1> 形状の最適化

Fig. 3 に形状最適化の結果を示す。中央右側の円形のプロットがベンチマークモータで、その他の点はマグネット形状と直径を種々変化させて解析を行った結果である。左上に位置するものほど特性が良いモデルとなる。最適化解析することで基準となるモータよりも大きな平均トルクと小さなトルクリプルを両立するモータモデルを得ることができた。この中から設計条件を満たすモデルを抽出し、磁石渦電流解析を行った。

〈5.2〉 磁石分割による渦電流損の低減

Fig. 4 に分割した磁石の渦電流損を示す。磁石を分割しない場合は 30 W 程度の磁石渦電流損が発生することがわかる。また、グラフより径方向に分割した方が渦電流の低減効果が大きく、少ない分割数で大幅に渦電流を低減することができる。

〈5.3〉 磁石分割による平均トルクの特性

Fig. 5 に磁石分割数と平均トルクの関係を示す。磁石間のギャップは絶縁層が必要であるため、0.1 mm としており、分割数が増加するとともに平均トルクが下がる。これより周方向に分割したモデルの方が平均トルクの減少が少ないことがわかる。3 分割までは両モデルの差は少ないが、10 分割になると 4% 程度の差が生じる。

〈5.4〉 磁石分割によるトルクリプルの特性

Fig. 6 に磁石分割数とトルクリプル率の関係を示す。トルクリプル率は分割方向や分割数に関わらず概ね一定の値を示した。これより磁石分割をしたことでトルクリプルの悪化などは生じないことがわかる。

6. まとめ

オープンスロットにすることで、SMC 材ステータコアが作りやすくなる一方で、トルクリプルの増加や磁束が巻線に直接鎖交することによる導体渦電流損が生じる。トルクリプルに関しては分数スロットの採用と、マグネット形状の最適化によって低減し、導体渦電流損に関しては直径の小さな巻線を多数並列にすることで解決している。磁石形状の最適化によって初期設計のモデルよりもトルクリプルを 10% 以上低減することができ、ネオジウム磁石の渦電流損に関しても分割することにより大幅な低減を実現した。減磁特性に関しては分割方向に関わらず一定であり、分割方向や分割数ごとに考慮する必要はない。直径 100 mm 程度のアキシシャルギャップモータにネオジウム焼結磁石を用いる場合は径方向に 3 分割程度すると損失も低減できるとともにトルク減少の影響が少ないことが判明した。径方向に分割する場合は同一形状の磁石を製作すればよいため、コスト面でもメリットが大きい。

文 献

- (1) 神山・野口・服部・山田・横山：「高トルク密度車載用モータの開発」平成 29 年電気学会全国大会, No.5-004, pp.7-8 (2017)
- (2) 三浦・茅野・竹本・小笠原：「次世代ハイブリッド自動車用フェライト磁石アキシシャルギャップモータの提案」半導体電力変換研究会, Vol.149, No. SPC-09-159, pp.59-64 (2009)

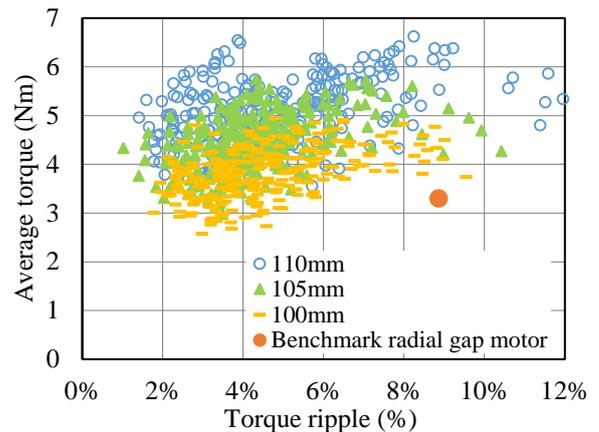


Fig. 3. Relationship between torque ripple ratio and average torque.

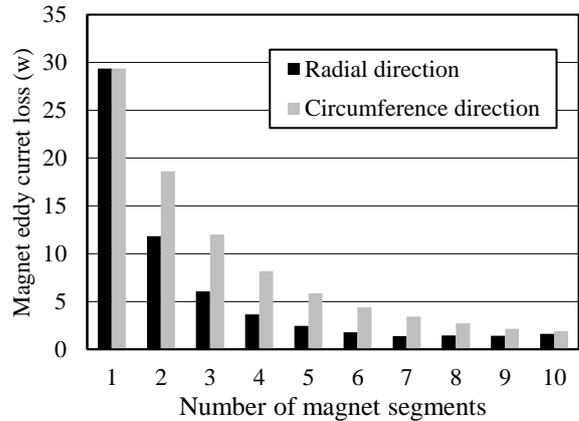


Fig. 4. Magnet eddy current loss with respect to segmentation.

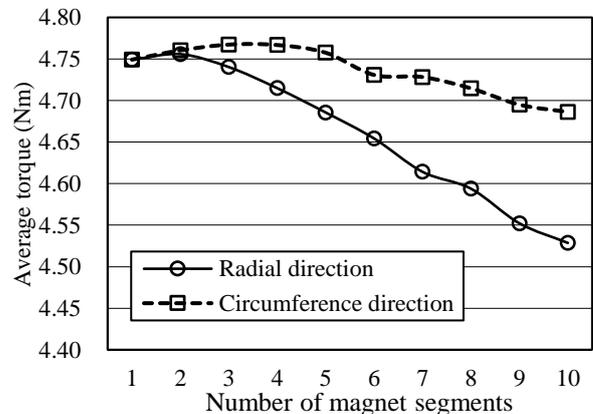


Fig. 5. Average torque with respect to segmentation..

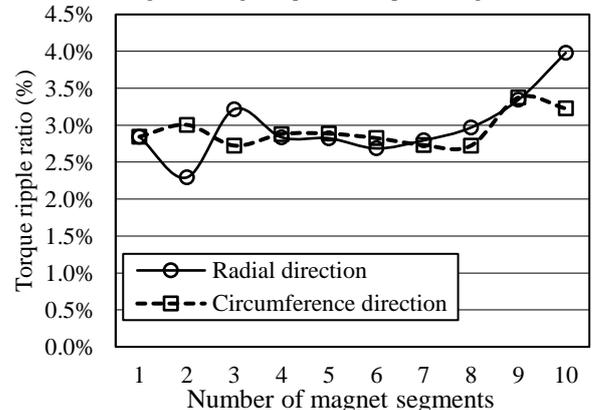


Fig. 6. Torque ripple with respect to segmentation.