

超高速PMモータの導体バー渦電流損に関する基礎検討

小森 健裕*, 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study on Eddy Current Loss in Copper Winding Bars of Ultra High-Speed PM Motor

Takehiro Komori, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

筆者らはスーパーチャージャの電動化を目標とし、低電圧で駆動される超高速モータの開発に取り組んできた。このモータでは同期インピーダンスを極限まで低減し、鉄損と銅損の最小化を行うことで純電氣的効率は97%、パワー密度は $26\text{W}/\text{cm}^3$ に達することを明らかにした⁽¹⁾。しかし、純電氣的な総損失において巻線で発生する渦電流損は考慮してこなかった。そこで本稿では、巻線で発生する導体渦電流について検討し、磁気遮蔽、巻線配置、セグメント導体の効果を三次元有限要素法(3D-FEM)により定量的に明らかにしたので報告する。

2. 解析条件

図1に解析対象にしたモータモデルを示す。検討するモータは直流12V電源の擬似電流形三相インバータによって駆動され、最大出力3kW、最高回転数150,000 r/minという仕様をもつ。固定子は6極6スロットの単純な集中巻構造で、巻線は2ターン2並列と極めて少ないターン数であるため、長方形の断面をもつ導体バーで構成されている。これにより、巻線抵抗と同期インダクタンスを $0.2\text{m}\Omega$ 、 $0.294\mu\text{H}$ まで低減している。なお、導体渦電流に対する効果を見やすくするため、意図的に磁石の体積を増加させエアギャップを狭くしている。

3. 損失の発生要因

低電圧駆動の超高速モータは磁気回路的観点からエアギャップを大きく設計するので、通常のモータに比べ漏れ磁束が多くなる。また、通常の銅損や鉄損の他に高周波駆動のため、以下に示すような特有の損失が指摘されている⁽²⁾。

- (1) 各巻線導体内部において鎖交磁束の変化により発生する渦電流損
- (2) 並列巻線の各巻線における鎖交磁束の差から発生する並列巻線間の循環電流による損失

一般的に鎖交磁束は永久磁石による主磁束、スロット開口部と永久磁石表面間を鎖交するエアギャップの漏れ磁束、スロット底部とスロット開口部間を鎖交するスロット漏れ磁束が考えられる。極数がある場合、界磁束は極数の部分を集中的に通る、スロット内に流入する量は僅かなので導体に直接鎖交する磁束も少ない。しかし、大きなエアギャップをもつモータの場合、漏れ磁束が巻線に流

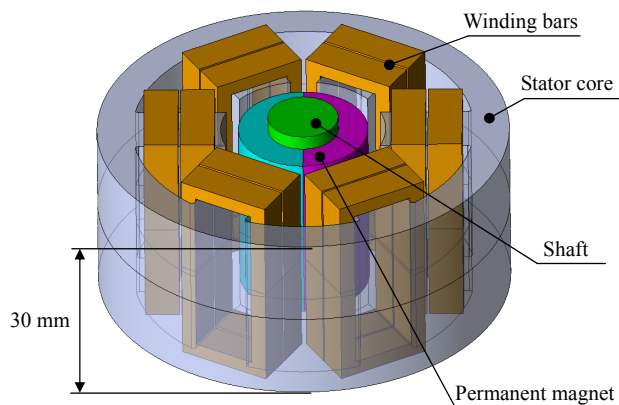


図1 解析モデル

Fig. 1. Analysis model.

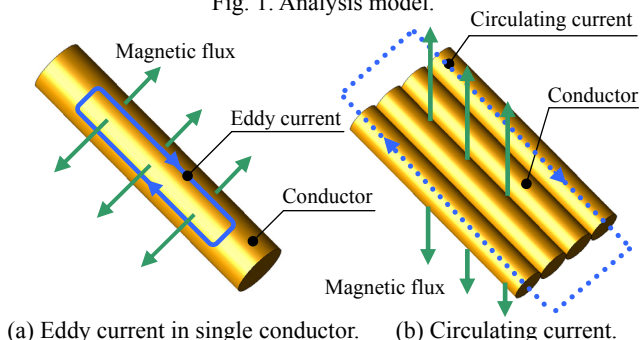
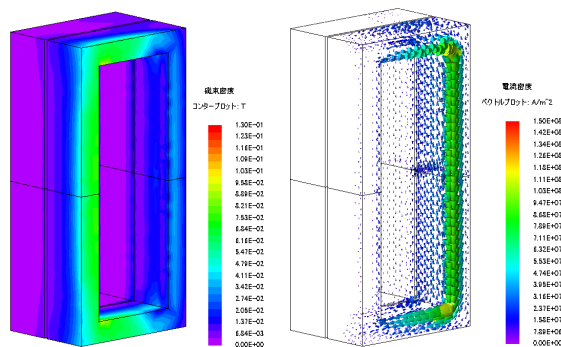


図2 導体渦電流損の原因

Fig. 2. Eddy current loss mechanism in conductor.



(a) Magnetic flux density. (b) Eddy current density.

図3 導体の磁束密度と渦電流密度

Fig. 3. Magnetic flux density and eddy current density in conductor.

入ることにより、導体内に渦電流損を発生させる。各巻線内部に発生する渦電流の概念図を図2に示す。図2 (a)は導線1本の内部にて鎖交磁束の変化により発生する渦電流を示し、図2 (b)は並列巻線の各巻線における鎖交磁束が位置により大きさが異なることで流れる循環電流を示している。図3は定格回転数 150,000 r/minにおける導体の磁束密度と渦電流密度である。ロータからティースに流入する磁束の一部が巻線に直接貫通し、巻線内で渦電流が発生していることがわかる。

4. 磁気遮蔽とセグメント導体の効果

図4は比較検討するティース形状を示したものである。図5はティース形状の違いによる磁気遮蔽の効果を調べたものである。ティースのつばが全くないストレート形状は漏れた界磁磁束がスロット内に流入する。面取り形はティースの外側へ漏れる磁束により、ストレート形状より導体渦電流損が増加した。また、つば付きにすることで渦電流損はストレート形状に比べ約30%まで低減した。ティースのつばがギャップ近傍の巻線に鎖交する磁束を遮蔽するため、導体渦電流損を大幅に減少させることができる。図6はスロット深さとロータ回転角によって変化する導体の磁束密度を示したものである。導体の磁束密度は $\theta = 2 \text{ deg}$ 時から徐々に減少していき、 $\theta = 164 \text{ deg}$ 時に最小となり、再度、 $\theta = 352 \text{ deg}$ まで増加していく。導体に発生する渦電流損は2つの最小曲線と最大曲線で示される磁束密度変化 ΔB の二乗に比例して増加するので、特にギャップ面近傍では渦電流損が増加する。一方、スロット底部の磁束密度変化は微小なので巻線には渦電流がほとんど流れることはない。したがって、磁束密度変化の少ないスロット底部に巻線を配置することで渦電流損を大幅に低減することができる。更に、導体渦電流損は導体の断面積に比例するのでセグメント導体の効果も調べた。図7はセグメント導体の渦電流密度と損失密度である。セグメント導体は導体断面積を径方向に4分割し、それぞれを並列に接続することにより構成している。これによりギャップ面近傍の渦電流密度が緩和され、導体渦電流損が減少していることがわかる。

5. まとめ

本稿では、3D-FEM解析を用いて、超高速PMモータの巻線内に発生する導体渦電流の誘導メカニズムを明らかにした。また、導体渦電流の対策として磁気遮蔽やセグメント導体が有効であることを示した。今後は、試作機を用いて損失分離試験を行う予定である。

文献

- (1) 野口季彦・和田哲朗・鹿野将・小森健裕：「効率とパワー密度の最大化を図った低電圧駆動1.5kW, 150,000 r/min超高速PMモータ」電気学会論文誌, vol. 134-D, no. 6, pp. 641-648 (2014)
- (2) 三浦司：「1kWフライホイール発電電動機の試作」富士時報, vol. 72, no.5, pp. 296-299 (1999)

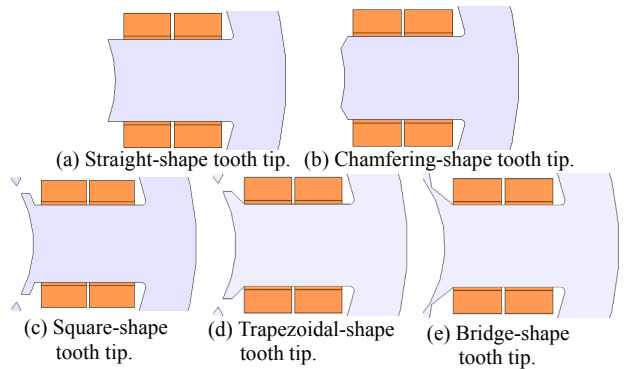


図4 検討対象としたティース形状

Fig. 4. Teeth shapes for comparative study.

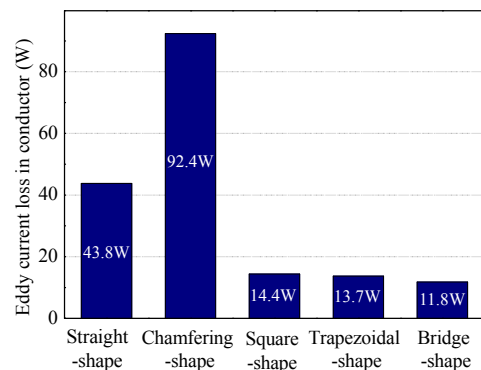


図5 ティース形状に対する導体渦電流損

Fig. 5. Eddy current losses in conductor with respect to teeth shapes.

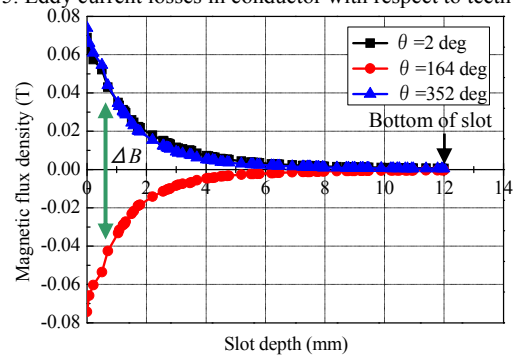
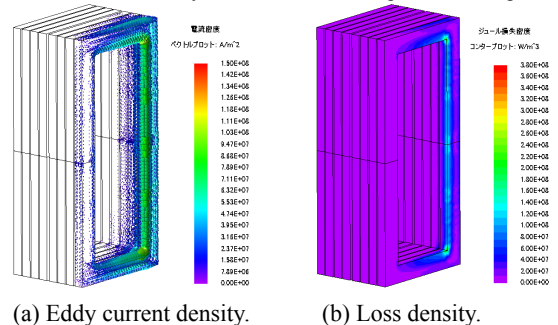


図6 スロット深さに対する導体の磁束密度

Fig. 6. Magnetic flux density in conductor with respect to slot depth.



(a) Eddy current density. (b) Loss density.

図7 セグメント導体の渦電流密度と損失密度

Fig. 7. Eddy current density and loss density in segment conductor.