

パーミアンス法と有限要素法による 永久磁石同期電動機のステータ鉄損計算の比較

◎佐藤 大介 伊東 淳一
長岡技術科学大学 大学院工学研究科
{dsato@stn|itoh@vos}.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

近年、電動機駆動システムの高効率化を目的として、永久磁石同期電動機の研究が盛んに行われている。一般に、電動機の鉄損解析は有限要素法(FEM)により行う⁽¹⁾。しかし、FEMは長時間の解析となることが多く、損失最小点などの最適解を導出するために幾度も解析する手法としては適切ではない。一方で、従来から電動機の簡易設計にはパーミアンス法が使用されている^(2,3)。

そこで著者らは、鉄損計算における最適解導出の一手法として、鉄損の概算をパーミアンス法で行い、詳細の解析をFEMにより行う方法を提案する。本稿ではその第一段階として、ステータ部の鉄損を計算し、FEMによる計算との比較からその精度を検証する。

2. モータの等価磁気回路

一般に、パーミアンス法では磁気回路を等価的な直流の電気回路で表現し、計算する。しかし、この方法では磁束密度の時間変化を計算することができない。また、電動機の場合、ロータは回転し、ステータは静止しているため、一つの回路上で表現することができない。そこで、最初にロータのみの等価回路にてギャップ間磁束を求める。続いて、求めたギャップ間磁束をステータの等価回路の入力として、ティースやヨークの磁束密度の時間変化を導出する。

図1に使用する電動機の解析モデル、表1にパラメータを示す。使用する電動機は、集中巻埋込磁石電動機であり、平行に着磁されたネオジウム磁石が埋め込まれている。また、周期角度は60度である。

図2にロータの等価磁気回路を示す。ここでは、機械角30度の領域を対称とみなし、等価回路を図1に示す1極の半分の領域で構成する。磁気抵抗 R は(1)式で与えられる。

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad (1)$$

μ は透磁率、 l は材料の長さ、 S は断面積である。ロータコアの磁気抵抗は永久磁石の磁気抵抗 R_m 、

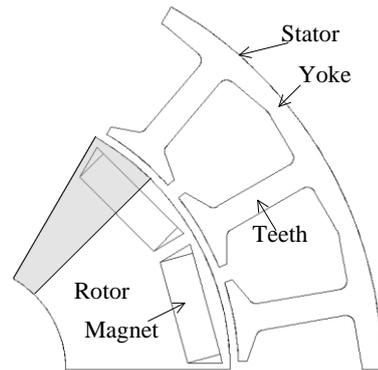


Fig. 1. IPM Motor model.

Table 1. Parameters of IPM motor.

Core	35H300 / Nippon Steel
Magnet	NMX-41SH / Hitachi Steel
Number of poles	12
Number of slots	18
Coil turns per teeth	11
Outer diameter of stator	100 mm
Outer diameter of rotor	64 mm
Gap length	1 mm
Iron stack length	50 mm

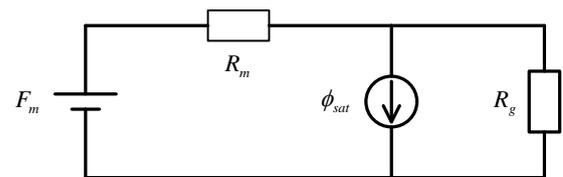


Fig. 2. Equivalent circuit of rotor.

ギャップの磁気抵抗 R_g に対して十分に小さいため、無視する。また、永久磁石による起磁力 F_m は(2)式で表される。

$$F_m = H_e l_m \quad (2)$$

H_e は磁石の保持力、 l_m は磁石の長さである。なお、永久磁石とロータ外径の間の部分で磁気飽和が発生することから、磁束源 ϕ_{sat} を用いて表現する。図2と以上の計算により、ギャップ間磁束の最大値を求めることができる。

図3にステータの等価回路を示す。ギャップ間磁束を発生させる要素として仮想的に交流の起

磁力源 F_g を置く。これにより、回転するロータの影響を考慮することができる。また、磁石の配置から F_g は台形波と仮定する。図 2 の等価回路から導出した磁束を発生させる起磁力を最大値として、磁石の幅とティース先端部の幅の比率から波形を決定する。起磁力の位相はティースの位置から決定する。また、コイルに流れる交流電流 $I_m \sin(\omega t + \theta)$ による起磁力 F_i は(3)式で与えられる。

$$F_i = NI_m \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

N はティースごとの巻線ターン数である。なお、ティースとヨークの磁気抵抗は磁気飽和の影響を考慮する必要があるため、飽和磁束領域では起磁力に応じて磁気抵抗値を変化させる。以上により、ティースとヨークの磁束密度の時間変化を求めることができる。

3. 磁束密度と鉄損の比較

計算条件として、回転速度 3600 r/min、電気周波数 360 Hz、電機子電流 18 A_{rms} とする。FEM は 2 次元モデルにより行う。

図 4 にパーミアンス法と FEM により求めた磁束密度波形を示す。ティースの磁束密度波形は 1.75 T で飽和しており、FEM の結果と概ね一致している。また、ヨークの磁束密度波形はピークが急峻に変化していることが確認でき、FEM による波形とは異なっている。

図 5 に図 4 の磁束密度の高調波解析結果を示す。基本波成分はパーミアンス法と FEM とではほぼ一致している。しかし、永久磁石の起磁力による奇数次高調波成分に誤差が生じている。特に、パーミアンス法では 3 次、9 次高調波が現れておらず、ヨークでは大きく異なる。これは、起磁力 F_g が 3 の奇数倍の高調波を打ち消し合うことが原因である。

次に、導出した磁束密度とコアの鉄損曲線をもとにステータの鉄損を計算する。鉄損曲線には必要な周波数における損失が記載されていないため、線形補間を行う。その結果、鉄損は 30.4 W となり、FEM により求めた鉄損 31.3 W に対する誤差は 2.9% である。基本波成分が支配的であり、高調波成分による損失が小さいことから、磁束密度における高調波成分の誤差の影響は小さいことが確認できる。

4. まとめ

本稿では、パーミアンス法を用いてステータの磁束密度と鉄損を計算した。今後は、パーミアンス法を用いたロータコアと永久磁石の鉄損計算と電機子電流の高調波成分による鉄損の計算を

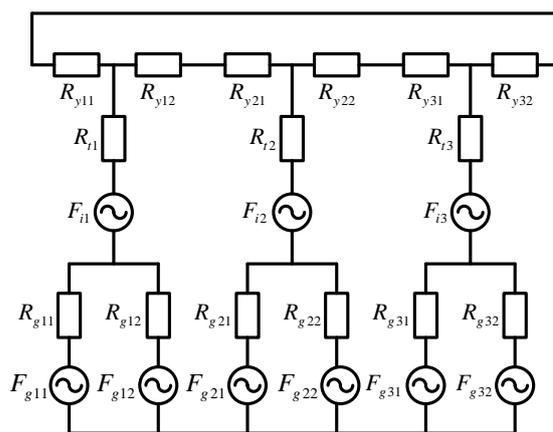


Fig. 3. Equivalent circuit of stator.

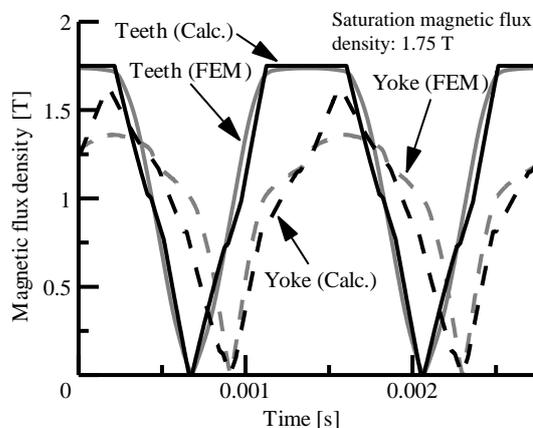


Fig. 4. Waveform of magnetic flux density.

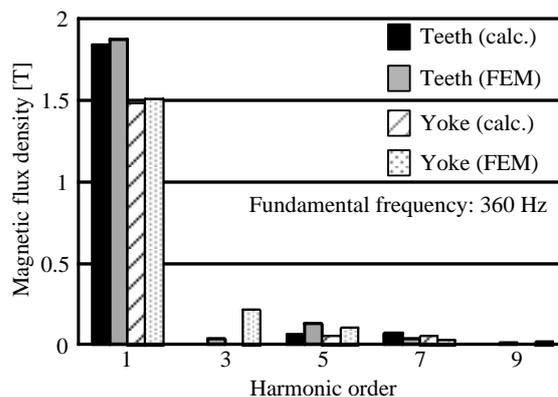


Fig. 5. Harmonic component of magnetic flux density.

行う予定である。

文 献

- (1) 山崎, 磯田: 「集中巻 IPM モータの鉄損及び磁石渦電流損解析」, 電学論 D, Vol. 128, No. 5, pp. 678-684 (2008).
- (2) 武田, 松井, 森本, 本田: 「埋込磁石同期モータの設計と制御」, オーム社 (2001).
- (3) 大川: 「永久磁石磁気回路・磁石回転機設計マニュアル」, 総合電子リサーチ (1989).