

種々の損失を考慮した 超高速モータ駆動システムの効率改善に関する一考察

◎鹿野 将 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

1. 概要

筆者らは、車載用スーパーチャージャの電動化を目的として超高速モータの検討を行ってきた。この検討において、インバータの FET 導通損を考慮したモータ設計を行うことで、インバータを含む駆動システム全体の効率を改善できることが確認された⁽¹⁾。本論文では機械損など種々の損失を考慮して超高速モータの効率改善について考察したので報告する。

2. モータ駆動システムの損失

今回検討する超高速モータは表 1 のような諸元をもつ永久磁石モータである。このモータは車載用のため 12 V 電源による大電流駆動となり、インダクタンス成分を小さくすることが要求される。そのため、コイルは巻数 1 の集中巻とした。しかし、集中巻は起磁力分布に大きな高調波が含まれる。さらに、超高速モータはその変化周期が非常に短いため、回転子の磁石内で渦電流損が生じる問題があり、その検討および対策が必要である。

一方、モータ効率が最大となる条件として鉄損と銅損を等しくすることが挙げられる。これは鉄損が駆動電流に依存せず、銅損が駆動電流の 2 乗に比例するためである。しかし、定速運転を行った場合、実際のモータ駆動システムの効率最大条件は次式のように与えられる。

$$W_i^{st} + W_e^{mag} + W_m = W_c + W_{Ron} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W_i^{st} は固定子鉄心の鉄損、 W_e^{mag} は磁石の渦電流損、 W_m は機械損、 W_c はコイルの銅損、 W_{Ron} はインバータの FET 導通損である。インバータには他に FET のスイッチング損が存在するが、これは近似的に駆動電流の 1 乗に比例するため、駆動システムの効率最大条件 ((1) の両辺の比) に影響しない。

表 1 解析対象とする超高速モータ
Table 1. Ultra high-speed motor to be analyzed.

| Motor type | SPM synchronous motor |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Stator configuration | Concentrated windings |
| Number of poles | 2 |
| Number of stator slots | 6 |
| Stator outer diameter (mm) | 92 |
| Stator inner diameter (mm) | 28 |
| Stator stack length (mm) | 30 |
| Teeth width (mm) | 10 |
| Airgap length (mm) | 3 |
| Magnet thickness (mm) | 5 |
| Magnet Br (T), iHc(kA/m) | Nd-Fe-B, 1.26, 954.9 |
| Rotor shaft diameter (mm) | 12 |
| Thickness of steel sheet (mm) | 0.1 |
| Driving current waveform | Three-phase sinusoidal waveform |
| Phase angle | In phase with e.m.f. |
| Motor speed (r/min) | 150,000 |
| FET ON resistance (mΩ/phase) | 2 |

3. 解析結果

表 1 の超高速モータについて有限要素法による磁場解析を行った。この方法では、電磁的に生じる損失しか計算することができないため、今回は機械損や(1)中に含まれない FET のスイッチング損を無視している。

図 1 にコイル銅損と固定子鉄損だけの比に対する効率を示す。図 1 の #1 はコイル銅損とステータ鉄損のみから計算した理想的な場合の効率であり、#2 は(1)中にある種々の損失を含めた駆動システムの効率である。図 2 に本駆動システムの効率最大時における損失分析結果を示す。このときのモータ出力は 680 W である。図 1 より種々の損失を考慮した場合、コイル銅損と固定子鉄損の比が 0.08 のときに効率が最大となる。これは図 2 に示すように、FET の導通損が全損失の 48 % と支配的なためである。図 2 より最大効率時は $W_i^{st} + W_e^{mag}$ と $W_c + W_{Ron}$ が拮抗し、(1) が成立することがわかる。

4. まとめ

一般にモータおよびインバータの仕様から機械損やインバータ損失は決定されるが、その値を考慮しつつ(1)が成り立つように装荷分配してモータ設計をすることで、モータ駆動システム全体の効率を改善することができる。

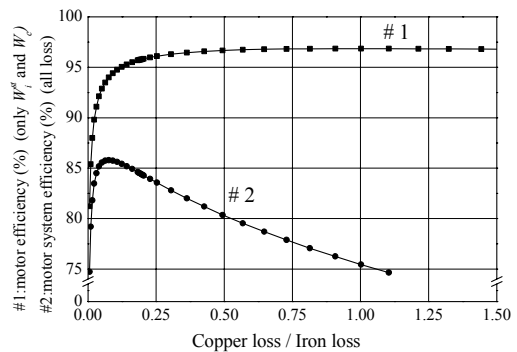


図 1 駆動システム効率

Fig. 1. Drive system efficiency.

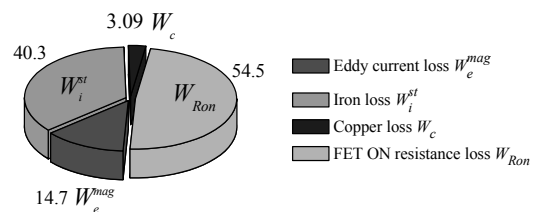


図 2 最大効率駆動時の損失分析結果

Fig. 2. Loss analysis result at maximum-efficiency operation.

参考文献

(1) 鹿野, 野口: 「150,000 r/min-1.5kW PM モータのパフォーマンス係数最適化による効率改善」, 電気学会産業応用部門大会 R3-7(2006)