高効率・高出力コアレスモータに関する試験研究

1. はじめに

茨城県の県北臨海地域は国産モータ発祥の地であり, 長年培われたモータ関連技術を有した企業が多い。し かし昨今モータ業界では、省エネ・低コスト化に対す る要求が厳しく、付加価値の低いモータは海外での生 産がメインとなってきている。そこで、他の各種モー タに対して優位な特徴を持つコアレスモータについて、 高効率・高出力化に必要な技術構築を行う。

一般的なコアードモータの分解図を図 1, コアレス モータの分解図を図2に示す。コアレスモータは、一 般的なコアードモータと異なり回転体にコア(鉄芯) がないことにより主に3つの長所を備えている。まず 一つ目としてコアがないため慣性モーメントが小さく, 応答性がよい。二つ目として巻線部にコアがないこと により巻線部のインダクタンスが小さい。従ってブラ シモータの整流時に発生する火花が小さく(あるいは 発生しない), ブラシの摩耗が少ない。 一般的にブラシ モータの構成部品の中では、ブラシ寿命が最も短いた め、ブラシの摩耗が少ないということは、モータ寿命 が長いこととなる。さらに三つ目として、コアードモ ータのコアと磁石の間に発生する磁気吸引力による脈 動トルク(コギングトルク)が発生しないことが挙げ られる。コギングトルクが発生せず、滑らかに回転す るため、モータの振動・騒音が小さくなる。以上のよ うな長所から、携帯電話の振動機能、ロボット、光学 機器など様々な用途として使用されている。



山下 宏* 小石川 勝男* 谷萩 雄一朗* 中川 健司*

現在, モータの開発には CAE (Computer Aided Engineering) 解析が不可欠となっているが、コアレス モータについては、通常のコアードモータと違い巻線 を鎖交する磁石磁束により発生する損失を考慮する必 要があるため、モデル化や解析手法が確立されていな い。図3にコアードモータの断面図,図4にコアレス モータの断面図を示し,具体的な影響を説明する。CAE 解析では、求めたい実機の現象に対して、影響しない 部分を如何に簡略化したモデル作成を行うかが重要な ポイントとなる。コアードモータでは磁石の磁束は透 磁率が高いコアの部分を通るため、磁石の磁束が巻線 に及ぼす影響は無視し、巻線モデルを塊りに簡略化し て CAE 解析を行うことができる。しかし、図4のコア レスモータでは、磁石の磁束が巻線を鎖交する影響を CAE 解析で表現する必要があり、巻線モデルを塊りに 簡略化してしまうと、実機に即した CAE 解析が行えな いことが課題となっている。



2. 目的

モータの高効率化を行うためには,損失が発生する 現象を正しく捉える必要がある。そこで,これまで検 討されていなかったコアレスモータの巻線部の交番磁 界より発生する損失について,CAE 解析を用いたシミ ュレーションを行ったので報告する。

3. 研究内容

3.1 コアレスモータの解析手法確立

通常の CAE 解析では,複数回巻かれたコイルを,接続される整流子片ごとに塊りとしてモデル化(図5(a))し,巻数の情報は回路の条件設定として行う。しかし,コアレスモータの場合は巻線を鎖交する磁束により渦電流が発生するため,巻線モデルを塊りで表現してしまうと実現象より大きな渦電流が流れ,実機特性との乖離が生じる。渦電流を正しく表現するためには導線を一本毎にモデル化(図5(b))する必要があるが,解析モデルのデータ量が非常に大きくなってしまい,現実的な時間での解析は不可能となる。



そこで、解析規模の増加を抑えながら実機に即した 解析モデルとして、巻線に発生する渦電流損の解析と モータ特性解析(巻線の渦電流損は未考慮)を分離し て行う手法を考案した(図6)。まず、巻線の渦電流損 解析では、解析の負荷を抑えるため、巻線に鎖交する 交番磁界を、計算のボリュームが大きくなる回転磁界 ではなく、電磁石により巻線部に任意の磁界を再現す ることとした。次にモータ特性解析では、巻線は一本 毎ではなく塊りとしてモデル化し、巻線に発生する渦 電流は考慮しないようにし、回転速度とトルクの関係 (NT 特性)やトルクと電流の関係(TI 特性)を求めた。



(巻線の渦電流未考慮) 図6 モータ解析手法

3.2 磁石特性測定試験

モータトルクの脈動低減手法として磁石の表面磁束 密度を正弦波状に着磁することが有効である。理想的 な正弦波と実際の波形の差はひずみ率として表現され, 波形の次数分析を行うことにより評価することが可能 である。今回 CAE 解析の精度を高めるため,解析ソフ トウェアのデフォルトの正弦波着磁(ひずみ率 0)は 利用せず,図7に示す磁石特性測定装置にて実機の磁 石磁束密度測定を行い,測定した磁束密度値を CAE 解 析の設定値とした。測定は既存製品3種類と本テーマ の評価用として試作を検討している磁石の計4種類に ついて行った。



図7 磁石特性測定装置概観

3.3 巻線渦電流解析

3.1 で記載したように巻線に発生する渦電流の解析 では、モータの回転磁界を電磁石で表現することによ り、計算ボリュームを抑えることとした。図8に示す よう巻線の両サイドに電磁石をモデル化し、電磁石の コイルに流す電流を任意に調整することにより巻線部 の磁束密度を設定した。解析は表1に示すとおり巻線 の線径違い5種類と、周波数違い5種類について行っ た。



表1 解析パラメータ

巻線線径[mm]	$\phi 0. 1, \phi 0. 12, \phi 0. 15, \\ \phi 0. 2, \phi 0. 3$
周波数[Hz]	50, 100, 150, 200, 250

3.4 モータ特性解析

巻線に発生する渦電流は考慮せずに(渦電流が流れ ないように設定)解析を行うため,巻線部については 接続される整流子片ごとに塊りに簡略化してモデル化 を行った。

なお,一般的なモータのCAE 解析では,磁界の分布 が平面で表現できると考え,初期検討の段階ではモデ ル規模を抑えられる2次元(断面)モデルで解析を行 い,最後の詳細検討を行うときに磁石端部の影響など を考慮するため3次元モデルで解析を行う。今回対象 としているラジアルギャップ型のコアレスモータは巻 線形状が3次元形状となっており,2次元では正しい 評価が行えないため,初期検討の段階から解析は3次 元で行った。



図9 モータ特性解析モデル(巻線の渦電流未考慮)

4. 研究結果と考察

4.1 磁石特性測定結果

測定結果例を図10に示す。横軸は角度,縦軸はN・S 極の磁束密度で,機械角360°の磁束密度を表している。 波形はきれいな正弦波となっており,理想に近い着磁 ができていることが推測できる。



高調波成分について詳しく評価するため、測定の結 果をFFTにより分析すると、既存製品のひずみ率は0.05 ~0.12、評価試作用磁石のひずみ率は0.04であった。 評価用磁石の分析結果を図11、図12に示す。測定した 波形と磁束密度基本波比をみると、3次成分がでており、 正弦波に対して尖った波形となっているが、基本波成 分に対する比率が小さいため、モータトルクの脈動へ の影響はほとんど無いと考えられる。

本測定にて得られた磁束密度を今回のCAE解析の材 料物性パラメータとして使用した。





4.2 卷線渦電流解析結果

解析時の磁束密度分布,電流分布の様子を図13に示 す。巻線部には電源の設定していないが,電磁石の交 番磁束の影響により,(渦)電流が流れていることが確 認できる。



次に線径5種類,周波数5種類の解析結果を図14に示 す。渦電流損は周波数の2乗および磁束密度の2乗に比 例することが知られている。本解析では磁束密度は一 定とし,周波数を変化させている。各周波数ごとの解 析結果は約2乗に比例しており,巻線に流れる渦電流を シミュレーションがきていることがわかる。また周波 数を固定し,巻線の線径違いの損失をみると線径が小 さい方が損失が小さくなることが確認できる。ラジア ルギャップ型のコアレスモータは一般的に細線を多く 巻く設計となっているが,本結果から製造面で問題が なければできるだけ線径の小さい巻線を選択すること により,渦電流による損失を抑えることができると考

茨城県工業技術センター研究報告 第39号

えられる。但し、線径を小さくすると抵抗が大きくなることや、モータは用途ごとに必要なトルクや回転速度が異なるため、設計仕様・製造品質などのトータルバランスを良くした巻線仕様を検討することが前提条件となる。



4.3 モータ特性解析

巻線の渦電流は考慮せず(渦電流が流れないように 設定)に計算したモータ特性のCAE解析例を図15に示す。 巻線部は塊りとして表現しているため、巻線部の抵抗 値や巻数あるいはモータに印加する電力源などについ ては、磁界解析とは別に回路の設定を行い、磁界解析 と回路解析を行っている。図16に回路の設定例を示す。

4.2の巻線渦電流解析結果を反映した合成モータ特 性の検討結果例を図17に示す。



図 15 モータ特性解析例(巻線渦電流損は未考慮)





図17 合成モータ特性検討例

5. まとめ

- 1. 通常ロータが回転することにより発生する交番 磁界を,電磁石を利用してモデリングすることに より,解析ボリュームを抑えながら巻線に発生す る渦電流を表現した。
- 2. 巻線に発生する渦電流損とモータ特性(渦電流 は未考慮)をそれぞれ分離して解析し,2つの解析 結果を合成することにより,巻線の渦電流を考慮 したモータ特性を求める手法を構築した。今後実 機測定を行い両者を比較する。

6. 今後の課題

- ・本研究の解析手法を利用した評価品試作
- ・試作品特性の確認(図18)
- ・CAE解析と試作品特性の比較検討及びCAE解析への フィードバック



図18 モータ特性測定装置概観