

# ダブルアキシヤルギャップ PM モータの ギャップ長不均衡に起因する運転特性の劣化

宇佐美和明\* 野口季彦 (静岡大学)

Operation Characteristics Deterioration Caused by Air-Gap-Length Imbalance of Double Axial Gap PM Motor  
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。また、扁平形モータはアキシヤルギャップ構造を用いるとラジアルギャップ構造のモータと比較して大幅に小形化できるメリットがある。アキシヤルギャップモータはトルク発生面が大きく取れるため、トルク密度やパワー密度の向上に極めて有効である。しかし、アキシヤルギャップモータはエアギャップがロータの取り付け位置で決定されるため、ラジアルギャップモータと比較してエアギャップ長の誤差が出やすい。本稿ではシミュレーションでロータの取り付け位置誤差を意図的に作り、各種運転特性の変化について検討したので報告する。

## 2. ギャップ長不均衡に起因する運転特性の変化

ダブルステータ・シングルロータ方式のダブルアキシヤルギャップ PM モータは、ロータの取り付け位置によって両側のエアギャップ長が変化する。ティースとマグネット間の距離を決めるロータの取り付け位置に誤差が生じると、一方のエアギャップは小さくなり、他方のエアギャップは大きくなる。そのためエアギャップが小さくなった側はより大きな吸引力が生じる。また、上下のコイルで磁束の割合が不均一になるため、上下のコイルで誘起電圧に差が生じる。上下コイルで誘起電圧が異なることにより、同相のコイル間で循環電流が流れる。これはダブルアキシヤルギャップ PM モータ特有の問題である。本稿ではロータの取り付け位置誤差に起因する電磁気的な特性変化について検討する。コイルの誘起電圧の差によって発生するコイル内部の損失、循環電流、平均トルク、トルクリプル、コギングトルクについてギャップ長不均衡に対する依存性を調べる。

## 3. 三次元電磁界解析の諸条件

電磁界解析ソフト (JMAG Designer 17.0™) を用いて、ロータの取り付け位置誤差を意図的に作り出し三次元解析

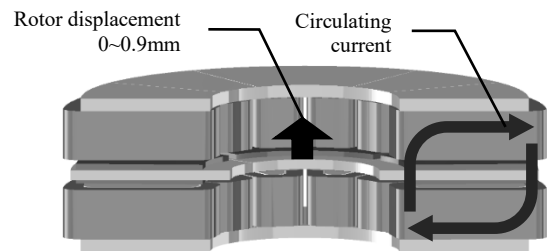


Fig. 1. Analysis model of double axial gap PM motor.

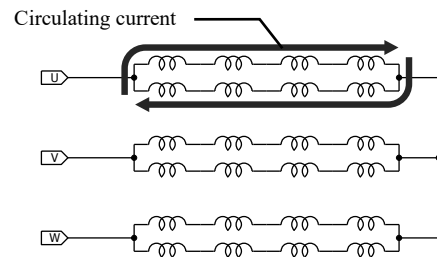


Fig. 2. Stator winding connection.

を行う。解析するダブルアキシヤルギャップ PM モータは 8 極 12 スロットのものとし、直径は 100 mm、厚さは 30 mm 程のモデルである。今回は一般的なスロットコンビネーションである整数スロットを用いた。また、トルクリプルの変化を観察しやすくするため、トルクリプルやコギングトルクが発生しやすいうようにスキューなどは施さず、標準的なダブルアキシヤルギャップ PM モータとした。解析モデルの断面図を Fig. 1 に示す。ロータの取り付け位置誤差はアキシヤル方向に 0~0.9 mm とする。無通電と通電した場合について検討し、回転数は 3000 r/min で通電時の電流は 1 相あたり 35 A<sub>rms</sub> とする。結線は上下の対面したステータコイルが並列になっているものとする。Fig. 2 に結線図を示す。これらの条件において各種特性がどのように変化するか解析する。

## 4. 解析結果

### <4.1> 損失の変化

Fig. 3 にロータの取り付け位置と損失の関係を示す。ロータの取り付け位置誤差が大きくなるにしたがって、損失が増加することがわかる。銅損は増加しているが、鉄損はあまり増加が見られないのは磁石を貫通する磁路が形成

されているためと考えられる。しかし、ロータ位置が動いたとしても総エアギャップ長は変化しないが、ティースとマグネットの形状が異なっており、ロータ位置の変化により漏れ磁束の量がわずかに変化することで鉄心中の磁束密度が変化する。これにより鉄損にもわずかながら変化が出たものと思われる。

#### 〈4.2〉 コイルの循環電流と銅損の変化

Fig. 4 にロータ位置と循環電流の関係を示す。コイル間の循環電流を観測すると、ロータの取り付け位置誤差に比例して電流が増加することがわかった。また、循環電流の大きさは回転速度にも比例するため、高速域で駆動する場合は、循環電流による銅損の増加が顕著になる。

#### 〈4.3〉 トルクの変化

Fig. 5 にロータ位置とトルクの変化を示す。トルクはロータの取り付け位置誤差に伴って増加することが判明した。一般的にトルクはエアギャップ長が短い方が大きくなる傾向がある。ロータがアキシヤル方向にずれると一方の面ではトルクが増加し、他方の面ではトルクが減少する。今回の検討ではエアギャップの増減が同時に起きており、トルクの減少分よりも増加分の方がわずかに勝っているため、このような結果になった。また、トルクリプルとコギングトルクもロータの移動距離に伴って増加することが確認できた。

#### 〈4.4〉 効率の変化

Fig. 6 にロータ位置と効率の変化を示す。わずかではあるが、効率が低下していることが読み取れる。循環電流による銅損の増加が主な原因と考えられる。

### 5. まとめ

密閉形のモータではギャップの取り付け位置を調節することは難しいため、シャフトに精度よく加工したスペーサをつけるなどの対策をする必要がある。平均トルクについては大きな性能劣化は見られないが、トルクリプルの増加に伴う振動や騒音が問題になると考えられる。また、大きな衝撃が加わった場合にロータとステータが接触する可能性も懸念される。循環電流の影響を低減するためには、上下のコイルを交互に結線することにより誘起電圧の差を打ち消すことが有効と考えられる。また、それぞれのコイルを直列ではなく、並列につなぐことで循環電流を低減することもできる。

#### 文 献

- (1) 神山博夢・野口季彦・服部晃尚・山田洋次・横山誠也：「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) 三浦昂彦・茅野真治・竹本真紹・小笠原悟司：「次世代ハイブリッド自動車用フェライト磁石アキシヤ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)

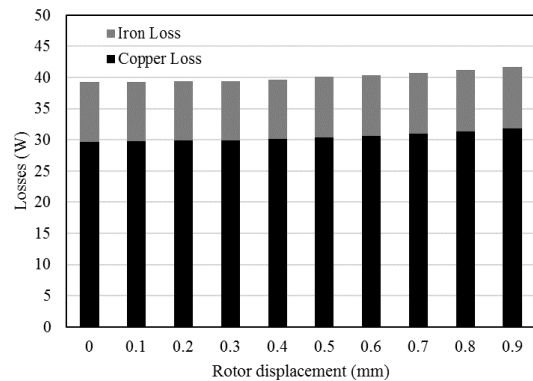


Fig. 3. Relationship between power losses and rotor displacement.

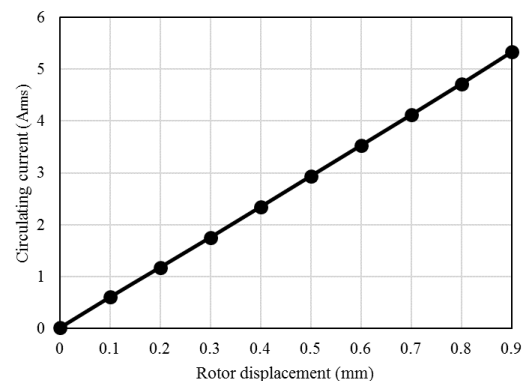


Fig. 4. Relationship between circulating current and rotor displacement.

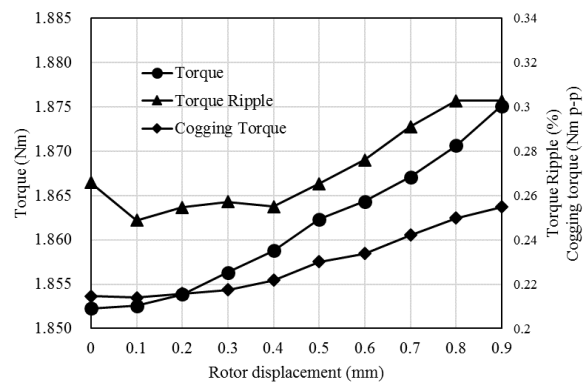


Fig. 5. Torque characteristics with respect to rotor displacement.

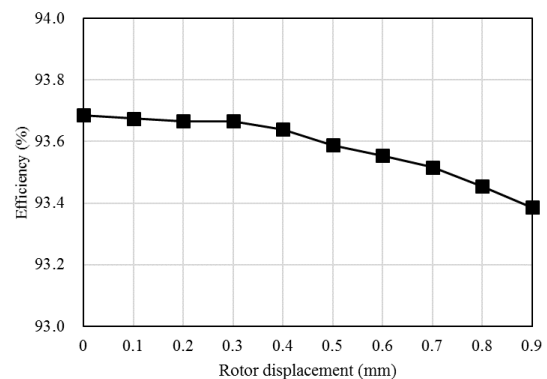


Fig. 6. Efficiency characteristic with respect to rotor displacement.