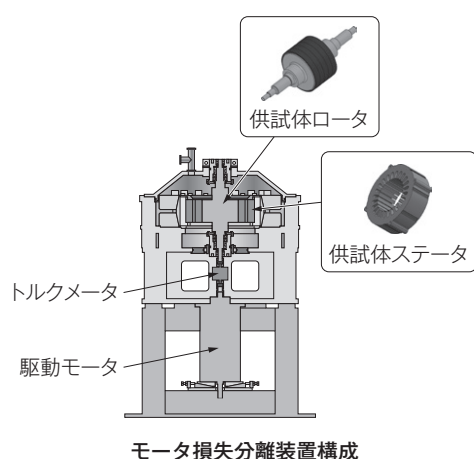


モータ実装環境下の損失分離評価

内山 翔 Sho Uchiyama

キーワード 損失分離, 機械損, 風損

概要



モータの高効率・低損失化を達成するには、モータで生じる損失を発生要因ごとに正確に把握することが重要である。そこで当社では、モータ損失分離測定装置を製作し、モータコア部を模擬した供試体の損失を測定し分離する手法を構築した。

機械損評価では、供試体部を減圧でき、減圧下の機械損測定によって本供試体の高速回転時の風損を分離できる。

鉄損評価では、ステータコアの焼きばめ模擬機構を用いた焼きばめ圧縮応力による鉄損劣化やステータコアを製作する過程の加工ひずみによる鉄損劣化を比較評価できる。

今回、機械損から風損を抽出する実験を行い、良好な分離測定結果が得られ、風損の損失増加要因を実験的に確認した。

1 まえがき

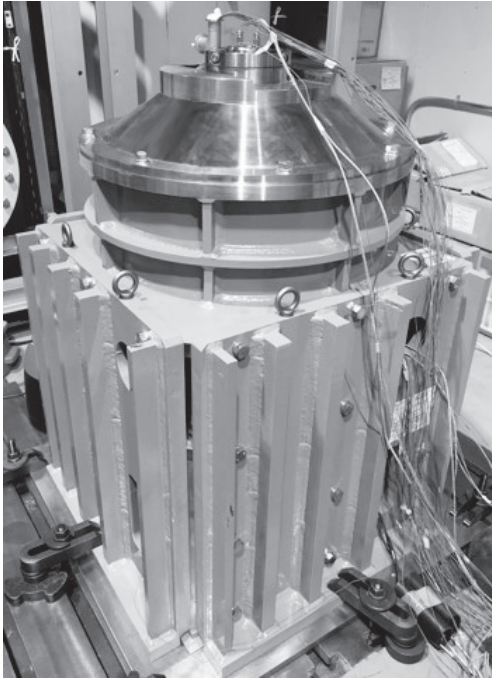
本研究では、モータで発生するエネルギー損失を低減し高効率化することを目指す。モータで生じる損失は、鉄損・銅損・機械損・漂遊損に大別される。主たる損失の鉄損以外にも無視できない損失発生要因が存在し、また、モータ構造や運転条件に起因した損失増加要因があることも周知の事実である。

すなわち、損失低減目標を達成するためには、モータ損失を正確に評価・分離し、主要因を明らかにして的確に対策していくことが必要である。そこで本研究では、モータ損失を分離測定するための装置を製作し、損失の定量評価に取り組んでいる。本稿では、機械損の分離測定を紹介する。

2 モータ損失分離装置の概要

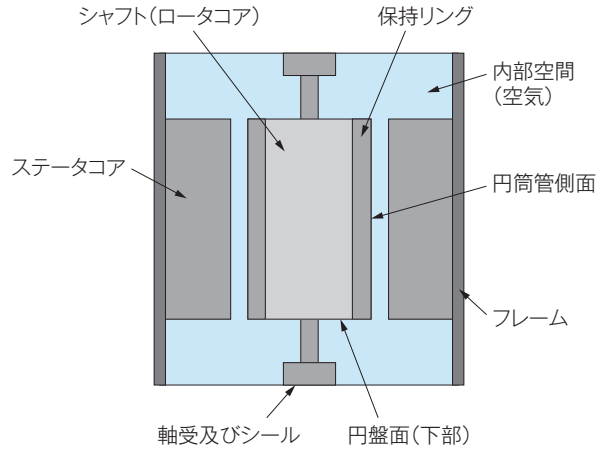
第1図にモータ損失分離装置の外観を示す。装置上部に供試体となるロータコアとステータコアを配置し、装置下部にある駆動モータの回転軸と供試体ロータ軸とがトルクメータを介して接続されている。この駆動モータで供試体ロータを回転させたときに発生する損失を軸トルクとしてトルクメータで検出する。

また、本装置は供試体部でモータの実装環境を模擬できるように、モータ内部の通風及び圧力、ステータコアへの焼きばめ圧縮応力を模擬する機構を有する。この機構を用いて、機械損評価では供試体部を減圧した状態の機械損を測定することで、機械損から風損を分離抽出できる。そして、鉄損評価では、ステータコアに任意の圧縮応力を付与した状態で鉄損を測定し、応力影響を評価できる。



第1図 モータ損失分離装置

製作した装置の外観を示す。



第2図 供試体模式図

機械損測定における供試体の構成と各部品・部位の名称を示す。

3 風損算定式

第2図に本装置の供試体模式図を示す。供試体のステータコアとロータコアは、外管静止・内管回転のラジアルギャップタイプの二重円筒管である。この条件下における風損は、ロータとステータの側面部分と、内管であるロータの上下円盤面でそれぞれ発生する。

内管の半径 r_i (m)、回転角速度 ω (rad/s)、周速 u_i (m/s) で回転しているときの円筒管側面で発生する風損をF. Wendt氏の論文⁽¹⁾から以下の式で算定する。

供試体状態及び試験条件からレイノルズ数 Re_r を式(1)から導出する。

$$Re_r \equiv u_i d / \nu \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 d はロータ外径からステータ内径までのギャップ長さ (m)、 ν は流体の動粘性係数 (m²/s) である。次に、摩擦モーメント係数 C_{Mr} は、レイノルズ数の大きさによって異なる経験式で示され、摩擦モーメント係数 C_{Mr} とトルク M_r の関係は式(2)で示される。よって、側面の風損 P_{Wr} は式(3)となる。

$$C_{Mr} \equiv M_r / (2\pi\rho r_m^4 \omega^2 L) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$P_{Wr} \equiv M_r \omega \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 ρ は流体の密度 (kg/m³)、 L は円筒高さ (コア積厚) (m)、 r_m は内外円筒の中央半径 (m) である。

続いて、ロータの上下円盤面で発生する風損は、Schlichting⁽²⁾によって提案されている以下の式で導出する。

レイノルズ数 Re_z は式(4)と定義する。

$$Re_z \equiv u_i r_i / \nu \quad \dots\dots\dots(4)$$

摩擦モーメント係数 C_{Mz} は、レイノルズ数の大きさによって異なる経験式で示され、摩擦モーメント係数 C_{Mz} とトルク M_z の関係は式(5)で示される。よって、ロータ上下円盤面の風損 P_{Wz} は式(6)となる。

$$C_{Mz} \equiv M_z / (1/2\rho\omega^2 r_i^5) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$P_{Wz} \equiv M_z \omega \quad \dots\dots\dots(6)$$

したがって、ステータ及びロータを模した二重円筒管で発生する風損 P_W は、円筒側面の風損 P_{Wr} 式(3)と上下円盤面の風損 P_{Wz} 式(6)の和で、式(7)で示される。

$$P_W = P_{Wr} + P_{Wz} \quad \dots\dots\dots(7)$$

なお、上記の式は内管のロータを円柱形、外管のス

テータを円筒形とし、全ての面が完全平滑状態を想定している。そのため、実際のモータに比べ理想状態であるが、これを基本式として検討を進める。

4 機械損測定概要

本装置を用いて供試体部で発生する機械損を測定する。供試体ロータコアは、永久磁石をロータ表面に貼り付けた構造を模しており、ロータ最外周には保持リングを備える。ここでは、永久磁石は未着磁の状態とする。また、シャフト両端には軸受とシールを備える。供試体ステータコアは、外乱を省く目的で円筒形状の鉄塊を使用し、スロット開口部を模した溝を設けたものと溝のない平滑面のもの二種類を用意した。

上記の供試体ロータコアを駆動モータで回転させることで、任意の回転数の機械損を測定できる。このとき供試体の機械損には、風損と軸受損とシール損が含まれる。

ここで、本実験では機械損から風損のみを抽出することを目的として、供試体部の内気圧力に対する機械損の推移を測定する。その結果から絶対真空状態の機械損を推定する。絶対真空の機械損は軸受損とシール損の合計であるため、大気圧下での機械損と絶対真空の機械損の差分を風損として抽出することができる。

5 機械損測定結果

第1表に減圧実験条件を示し、これを実験1とする。実験の結果、第3図に内気圧力に対する機械損

第1表 減圧実験条件

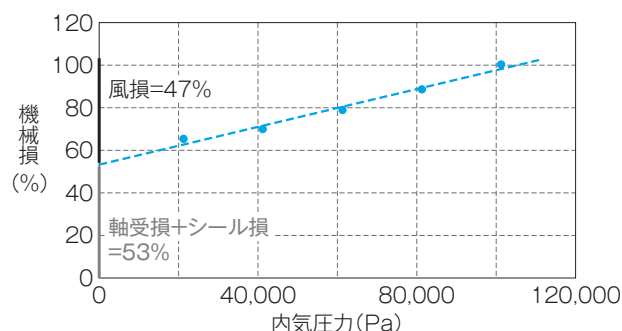
減圧実験の際の供試体コア条件と内気環境及び運転条件を示す。

ロータコア	未着磁ロータ
ステータコア	ステータ模擬円筒管
供試体内部流体	空気
減圧範囲	0～0.08MPa (0.02MPa刻み5点)
回転数	20,000min ⁻¹
供試体の損失	風損・軸受損・シール損

の推移を示す。ここでは、減圧前の機械損を100%としている。グラフから、内気圧力と機械損が比例関係にあることが確認できる。

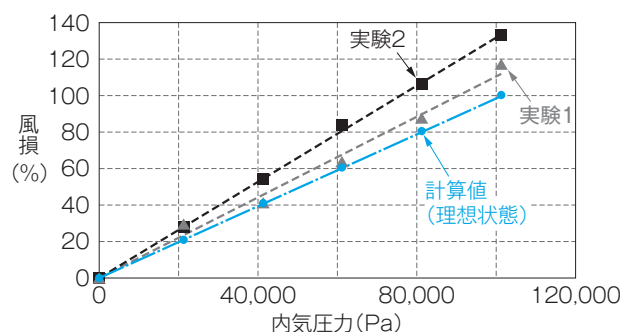
測定結果の近似曲線から、絶対真空での機械損はグラフの切片となり、その大きさは減圧前の機械損の53%となった。これが機械的接触に伴う機械損で、軸受損とシール損の合計値である。したがって、減圧前の風損は残りの47%となる。この実験方法によって、機械損から風損を抽出できることが確認できた。

第1表と同条件の実験を、ステータコアのスロット開口溝を有する状態で行い、これを実験2とする。風損を抽出し、その結果である内気圧力に対する風損の推移グラフを第4図に示す。3項に記した風損算定式(7)から求めた減圧前の風損値を100%として表記する。



第3図 内気圧力に対する機械損の推移

供試体内気を減圧することで、内気圧力と機械損の関係が線形性を示している。この線形で変化している損失が、空気摩擦由来の風損である。



第4図 内気圧力に対する風損の推移

計算値はロータステータ側面が平滑面を想定し、実験1はロータ粗面ステータ平滑面、実験2はロータ粗面ステータ凹凸面である。側面の状態が違ふことで風損へ与える影響を示している。

実験1は、保持リング付きロータとスロット開口溝のない平滑面のステータの組み合わせで、風損は計算値と比較して17%増加した。その要因の一つとして、ロータ表面の粗さによる摩擦の増加が考えられる。

そして、実験2は保持リング付きロータとスロット開口溝を有するステータの組み合わせで、計算値と比較して33%増加した。実験1からは16%増加しており、実験1・2の条件差から、スロット開口溝によるステータ表面の凹凸形状が要因であると考えられる。

実機のモータは実験2に相当することから、流体接触条件に配慮することで、風損低減設計ができる。

6 むすび

本研究では、モータ損失分離装置を製作し、機械損の測定及び風損を抽出し、良好な分離測定結果を得た。さらに、風損ではロータ表面・ステータ表面の状態が影響し損失増加を招くことが確認できた。

今後は機械損に加え、ステータ鉄損の損失増加要因を実測評価し、損失低減に取り組む所存である。

なお、この成果は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業未来開拓研究プログラム「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」の結果得られたものである。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) Von F. Wendt : "Turbulente Stromungen zwischen zwei rotierenden konaxialen Zylindern," Arch. Appl. Mech. 4 (6), pp.577-595, 1933
- (2) Schlichting, Boundary Layer Theory, McGraw-Hill Press, New York, 1979

《執筆者紹介》



内山 翔
Sho Uchiyama
基盤技術研究所
回転機の研究開発に従事