

250kW-20,000min⁻¹ 高速PMモータの特性評価

沖津隆志 Takashi Okitsu
内山 翔 Sho Uchiyama
松尾圭祐 Keisuke Matsuo
松橋大器 Daiki Matsuhashi

キーワード PMモータ, 高速回転, 損失

概要



高速モータ

ファン・ブロウ・コンプレッサなどの高速流体機械には、エネルギー変換効率を高めるべく、高速回転が求められる。

当社は、これら用途への適用を目指し、今回、磁気軸受を適用した出力250kW、回転速度20,000min⁻¹の高速・大容量のPMモータを開発した。これにより、ギヤで増速していたシステムをダイレクト駆動化することができ、システムのコンパクト化・低コスト化・高効率化を実現できる。

高速モータは、出力密度の増加に伴い損失密度も高くなる。このため、開発したモータの特性とその損失評価を行い、定格点におけるモータ効率96.6%、運転領域の最大効率97.5%の高い効率を得るとともに、更なる高効率化や高速・大容量化に向けた設計の精度向上のため、モータの各部で発生する損失を分離し、損失の割合を明らかにした。

1 まえがき

近年、地球環境問題に対する対策から、省エネルギー化への要求が高まり、小形・高効率化を実現した永久磁石同期電動機（PMモータ：Permanent Magnet Synchronous Motor）が様々な分野で適用されるようになってきている⁽¹⁾。

そこで当社は、高速流体機械（ターボブロウ・コンプレッサ・冷凍機など）への適用を目指し、磁気浮上式軸受⁽²⁾を用いた出力250kW、回転速度20,000min⁻¹の高速・大容量PMモータを開発した。本モータを高速流体機械に適用することで、ギヤで増速していたシステムのダイレクト駆動化を実現でき、以下の特長が得られる。

- (1) 装置構成がシンプルでコンパクト（省スペース）
- (2) ギヤの損失がなく効率が向上（省エネルギー）
- (3) オイルフリー（省メンテナンス）

- (4) 非接触回転で低振動・低騒音

モータを高速化することで、小形化・高出力密度化できる一方、損失密度も高くなる。そのため、適切な冷却方法の選定や損失低減が大きな課題となる。そこで本稿では、開発したモータの特性とその損失評価の結果を紹介する⁽³⁾⁽⁴⁾。

2 モータ仕様

第1表に開発した高速PMモータの仕様を、第1図にモータ断面のイメージを示す。本モータの主な特長は、以下のとおりである。

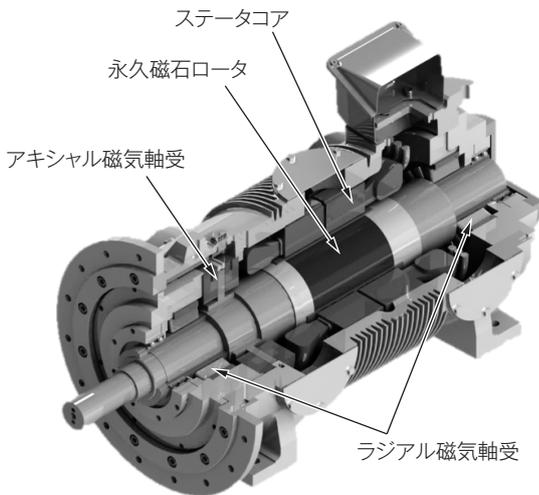
- (1) 磁気軸受を採用し、高速回転での安定浮上制御と軸受損の低減、潤滑油・グリースレスを実現
- (2) 回転子の保護リングにCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）を採用し、耐遠心力強度の確保と低損失化を実現

第1表 高速モータ仕様

今回開発した高速モータの仕様を示す。

項目	仕様
極数	2
定格出力	250kW
定格回転速度	20,000min ⁻¹
周波数	333.3Hz
定格トルク	119.4N・m
冷却方式	強制空冷
軸受	磁気軸受

.....



第1図 高速モータ断面イメージ

今回開発した高速モータの断面イメージを示す。

(3) 他冷ブローによる空冷方式を採用することで、水冷・油冷などの冷却循環システムが不要

3 無負荷損失の分離

無負荷状態で発生する損失を発生要因別に分離する方法について検討した。今回、無負荷のモータ入力電力から多項式で損失を分離する方法（以下、多項式近似による分離）と、未着磁のロータを用いて機械損を直接測定する方法（以下、機械損測定による分離）の2通りの方法で損失分離を行った。

3.1 多項式近似による分離

無負荷状態でモータを駆動する際に要する入力電力は、無負荷損失に等しい。また本試作機では、

磁気軸受を使用しているため接触による損失は発生しない。したがって、本試作機の無負荷損失は、回転による風損・鉄損（渦電流損・ヒステリシス損）・銅損に大別できる。

このうち銅損を除いた損失は、回転周波数に依存した損失で、無負荷損失を回転周波数の3次関数で表現した場合、3次の項が風損⁵⁾、2次の項が渦電流損、1次の項がヒステリシス損と分離することができる。したがって、無負荷損失 ($W_{NL-loss}$) の回転周波数 (f) 特性の近似式は、式(1)のように表すことができる。このとき、各項の係数をそれぞれ K_W , K_E , K_H とする。

$$W_{NL-loss} = K_W \cdot f^3 + K_E \cdot f^2 + K_H \cdot f \dots \dots \dots (1)$$

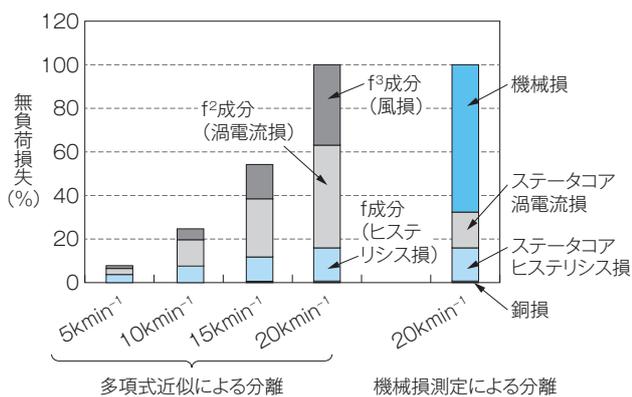
試験では、5000min⁻¹ごとに無負荷損失を測定し、その実測値を用いて、式(1)の各項の係数を導出することで、回転速度（周波数）に対する無負荷損失を分離した。

3.2 機械損測定による分離

モータを無負荷で駆動した場合には、ロータの永久磁石の磁束によって、ステータコアに鉄損が発生する。よって、ステータコアの鉄損を除いた風損及び磁気軸受の渦電流損（以下、機械損）は、モータ単体の無負荷損失と、着磁モータから未着磁モータを回したときの無負荷損失の差から求めることができる。またステータコアの鉄損は、モータ単体の無負荷損失と機械損の差であり、さらに多項式近似によって渦電流損とヒステリシス損に分離することができる。

3.3 無負荷試験結果

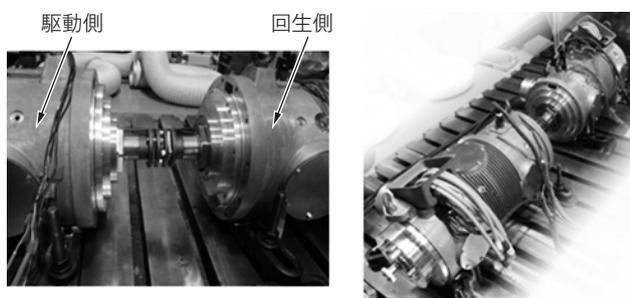
第2図に20,000min⁻¹の無負荷損失を100%とした分離結果を示す。多項式近似による分離結果から、高速回転ほど風損と渦電流損の占める割合が大きくなり、20,000min⁻¹では無負荷損失の80%以上を占めることが確認できる。また機械損測定による分離結果から、全体の約68%が機械損であることが分かった。したがって高速モータの高効率化を図るには、機械損をいかに低減するかが重要な要素である。



第2図 無負荷損失分離結果

多項式近似による分離結果から、20,000min⁻¹では風損と渦電流損が全体の80%以上を占める。また機械損測定による分離結果から、全体の約68%が機械損（風損及び磁気軸受渦電流損）である。

.....



第3図 対向試験の接続状態

同型試作機2台を対向状態で連結した状態を示す。

4 対向負荷試験

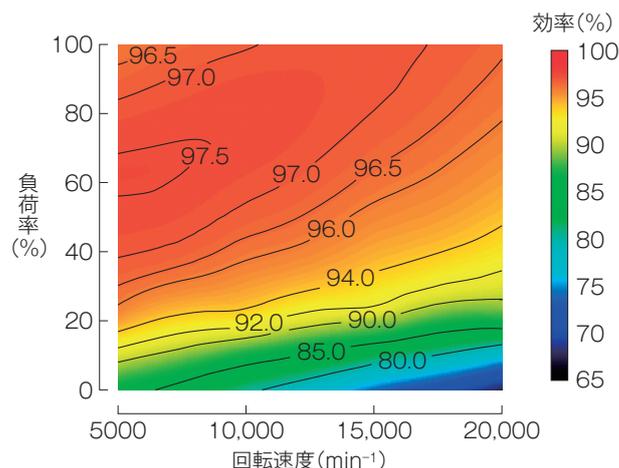
4.1 対向負荷試験方法

第3図に対向試験の接続状態を示す。同型試作機2台を対向状態で連結し、1台を駆動、もう1台を回生運転することで有負荷試験を行った。このとき、軸出力及びモータ効率を算出するためにパワーアナライザを使用し、駆動モータ及び回生モータの電圧・電流に加え、駆動側入力電力 (W_{in}) と回生側電力 (W_{out}) を測定する。軸出力 (W_{trq}) との関係はそれぞれ式(2)、(3)のように表現できる。

$$W_{in} = W_{trq} + (\text{loss of the drive motor}) \dots\dots\dots(2)$$

$$W_{out} = W_{trq} - (\text{loss of the regeneration motor}) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、本モータは駆動側と回生側の電流と電圧が



第4図 高速モータ効率マップ

対向試験で回転速度・負荷率ごとにモータ効率を測定した結果を示す。

ほぼ同等であるため、モータ損失も同等であると仮定すると、式(2)、(3)から、 W_{trq} は式(4)で導出できる。

$$W_{trq} = (W_{in} + W_{out})/2 \dots\dots\dots(4)$$

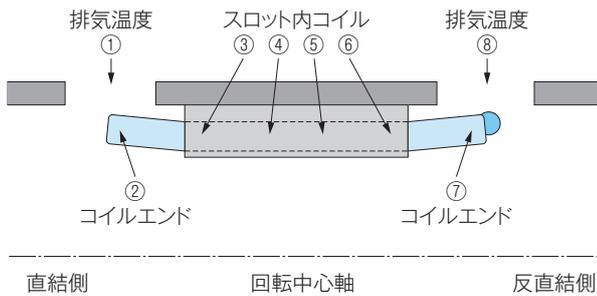
4.2 負荷特性

前述の測定方法で、定格250kW-20,000min⁻¹まで回転速度・負荷率ごとに電気特性を測定し、モータ効率を算出した。第4図に高速モータ効率マップを示す。定格点におけるモータ効率は96.6%、運転領域の最大効率は97.5%の高い効率を得た。高速域ほど効率が低下する傾向にあり、回転周波数の2乗・3乗で増加する損失（機械損）が効率に大きく影響することが分かる。機械損の発生要因を特定し、更なる高効率化を図ることは今後の課題である。

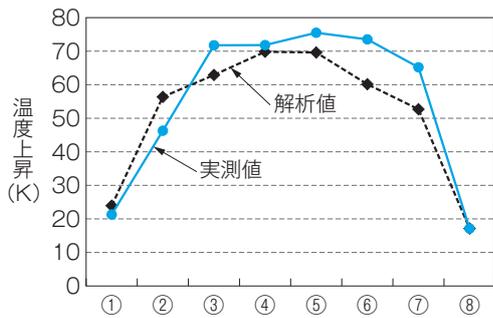
4.3 ヒートラン試験

第5図に定格運転（250kW-20,000min⁻¹）による各部の温度上昇の測定結果を示す。第5図(a)は温度測定位置（軸方向断面）、第5図(b)は温度上昇の実測値と解析値を示している。解析値は汎用の熱流体解析ソフトを使用して計算したものであり、実測値は各部に取り付けた熱電対にて測定したものである。

ヒートラン試験による温度測定の結果、電機子巻



(a) 温度測定位置(軸方向断面)



(b) 温度上昇

第5図 定格運転における各部の温度上昇測定結果

ヒートラン試験による各部の温度上昇の測定結果を示す。(a)に温度測定位置、(b)に温度上昇の実測値と解析値を示し、十分な冷却性能があることを確認した。

線の温度上昇は規定値を下回っており、十分な冷却性能があることを確認した。

第5図の解析値と実測値を比較すると、温度上昇傾向はおおむね一致しているが、実測の方がやや上昇値が高い傾向が見られる。この原因の一つとして、解析で設定した各部の損失分担に実測との差異があることが考えられる。特に高速回転では、風損と渦電流損の占める割合が大きいいため、これらを正確に推定することが重要である。

5 むすび

今回、250kW-20,000min⁻¹高速モータを試作・評価し、定格点におけるモータ効率96.6%、運転領域の最大効率97.5%の高い効率を実現した。また設

計精度向上のため、モータの各部で発生する損失を分離し、損失の割合を明らかにした。

今後さらに損失分離の精度を高め、モータの高効率化及び熱流体解析精度の向上を図るとともに、更なる高速・大容量モータの開発を進めていく所存である。

・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) PMモータの産業応用に向けた新技術調査専門委員会編：「PMモータの適用拡大に向けた新技術と新分野への応用動向」, 電気学会技術報告, 第1207号, 2010
- (2) 超高速ドライブ・ベアリングレス関連技術調査専門委員会編：「最新超高速ドライブ・ベアリングレス関連技術」, 電気学会技術報告, 第1058号, 2006
- (3) 内山・松尾・大西・沖津・松橋：「250kW-20,000min⁻¹高速モータの特性評価」, 平成27年電気学会全国大会, No.5-020, 2016
- (4) 「可変交流ドライブ技術の到達点と課題」, 電気学会技術報告第1326号, 2014
- (5) 生井武文：遠心軸流送風機と圧縮機, 朝倉書店, 1960

《執筆者紹介》



沖津 隆志
Takashi Okitsu
基盤技術研究所
回転機の研究開発に従事



内山 翔
Sho Uchiyama
基盤技術研究所
回転機の研究開発に従事



松尾 圭祐
Keisuke Matsuo
基盤技術研究所
回転機の研究開発に従事



松橋 大器
Daiki Matsuhashi
基盤技術研究所
回転機の研究開発に従事