

エネルギーキャッシュ向けフライホイールの損失分離

田中 賢太* 大沼 喜也 藤森 崇起 伊東 淳一 山田 昇
(長岡技術科学大学)

Loss analysis of a Flywheel Energy Storage System for an Energy Cache Operation

Kenta Tanaka*, Yoshiya Ohnuma, Takayuki Fujimori, Jun-ichi Itoh, Noboru Yamada

(Nagaoka University of technology)

This paper, evaluates a flywheel system of 15000r/min, 1.5MJ, for an energy cache system. The mechanical loss is calculated from the free-run test, and the copper loss is calculated from the measured current of the motor. As a result, the flywheel loss in the steady state consists of windage loss of 33.5%, the iron loss of 54.8% for the induction motor. Therefore, it is confirmed that the loss reduction for those component is important to obtain high efficiency for the high speed flywheel system.

キーワード：フライホイール，エネルギーキャッシュシステム，損失分離
(Flywheel, Energy cache system, Loss analysis)

1. はじめに

近年，地球温暖化防止の観点から，太陽光や風力といった再生可能エネルギーを用いた発電方式の導入が進められている。これらの発電方式は，発電時に温室効果ガスである二酸化炭素を排出しないクリーンな発電方法であることや，比較的小規模な発電システムで発電可能であるといった利点を持っている。しかし，日射量や風速など気象条件によって出力電力が大きく変動する問題がある。出力が不安定な発電システムを電力系統と連系すると，系統の電圧変動や周波数変動を引き起こすため，エネルギー貯蔵要素を組み合わせ，電力を平準化する必要がある。エネルギーを貯蔵するには，バッテリー，フライホイール(以降FW)，電気二重層キャパシタ(以降EDLC)などが挙げられるが，それぞれ異なる特徴を持つ⁽¹⁾。バッテリーは，エネルギー密度が高く電力補償量は大きいですが，充放電に化学反応を伴うため，高サイクルの充放電に制約があり寿命も短い。一方，EDLCは，化学反応を伴わず，イオンの移動で電力を貯蔵するため，充放電に強く，長寿命であり応答速度が速い。しかし，エネルギー密度が低いという欠点を持っている。FWは，消耗部品がFWとモータ/発電機の軸受のみであるため長寿命であり，短時間の充放電の繰り返しにも強い。また，電力補償時間は短い，応答が高速であるため変動周期の速い微小変動成分の抑制に適している⁽²⁾。

著者らは，耐環境性，メンテナンス性に優れているFWを，短時間の電力変動を補償するエネルギーキャッシュシステム(以降ECS)に適用することを目指し，15000r/min，1.5MJ

の高速回転型フライホイールを内蔵するFWシステムを開発している⁽³⁾⁽⁴⁾。ECSは，FWを一時的な貯蔵要素として利用することにより，バッテリーの飛躍的な長寿命化や容量低減を図ることができる。これまでFWはエネルギー密度を向上させるために，超高速仕様で設計され，そのため磁気軸受けなどの技術が必要となり，バランス取りも非常に難しかった。このため，本質的に安価なシステムであるにもかかわらず，コストが上昇していた。そこで，本研究の目的は，小型，低コストで信頼性の高いFWシステムを開発することにある。そのために，誘導機とFWの構成は横型を採用し，軸受にはボールベアリングが使用でき，バランス取りが容易な回転速度領域を仕様とする。

本論文では，真空引き状態での定常回転時の損失を求め，電氣的な損失と機械的損失に分離し，各種損失を解析した。論文では，定常回転時のモータをフリーラン状態にすることで機械損と電氣的損失を分離する。測定した電流から銅損を算出し，電氣的損失を銅損と鉄損に分離する。次に，シミュレーションによってベアリング損，風損を計算し機械的損失を分離する。最後に，定常損失の解析結果から，さらなる高効率化の際に重要なポイントを抽出し，その知見から，FW二号機の設計について検討したので報告する。

2. フライホイールシステムの構成と仕様

図1に製作したFWの概略図，図2に実際のフライホイールの写真，表1にその仕様を示す。FWシステムは，誘導機と回転体であるFWを組み合わせて構成する。ここでは，縦型に比べて構造が簡単化できる横型を採用した。また，

近年研究が進められている超伝導磁気軸受けなどの低損失な軸受は、複雑な制御、装置が必要となることから、システムの大型化、コストの増大といった問題を招く⁽⁵⁾。そこで、本機の軸受には、被膜処理を行ったボールベアリングを採用し、コストと性能の両立を図っている。

図3に補機類を含めたシステム全体の概略図を示す。FWを駆動するモータには簡単のため誘導機を、電力変換器として高速機用途の汎用インバータ(FRENIC5000H11シリーズ、富士電機)を採用した。また、FW加速時は誘導機が電動機として動作するが、FW減速時には誘導機が発電機として動作する。回生した電力を系統に回生するため、電力回生用の回生コンバータを取り付けている。モータ及び軸受には、温度過上昇を防ぐため、オイルクーラを用いて冷却し、風損を低減するため、真空ポンプを用いてFW密閉容器内の真空度を高めている。また、システムの実験評価のため、インバータ、誘導機、真空ポンプ及び、オイルクーラには電力計を取り付け、冷却系統には流量計及び熱電対を、誘導機、軸受、密閉容器内には熱電対を取り付けている。これらの構成から、FWを真空中で回転させることができるため、高速回転時における風損を低減することができる。

3. 電氣的損失の解析方法

本実験では、真空ポンプ、オイルクーラを動作させた後、FWを加速する。インバータの制御にはV/f制御を適用し、定格回転速度までの加速時間を680secとした。

FWの回転速度15000r/min定常回転時における実験結果より、誘導機とFWでの定常損失が4.8kWとなることがわかった。また、測定時における真空容器内の圧力は絶対圧力で30kPaとしている。

定格回転時に発生する消費電力は、電氣的な損失と機械的な損失の和となる。そこで、これらの損失を分離するため、定格回転時にモータを電氣的に切り離し、機械損のみでFWを減速させるフリーラン試験を行った。これより、モータとFWの消費電力4.8kWの内、1.97kWが風損とベアリング損を合わせた機械損となり、2.83kWが電氣的な損失となることがわかった。ここでは、電氣的な損失について詳細な解析を行う。

(3-1) 基本波成分に対する銅損の算出

図4に本実験で使用した誘導機の基本波に対する等価回路を、表2に各パラメータの値を示す。ここで、 R_1 を一次巻線抵抗、 L_1 を一次漏れインダクタンス、 R_2' を二次側巻線抵抗(一次側換算)、 L_2' を二次漏れインダクタンス(一次側換算)、 L_{lh} を励磁インダクタンスとする。

誘導機に発生する銅損は、一次側に流れる電流によって発生する一次銅損と、二次側に流れる電流によって発生する二次銅損がある。ここでは、二次銅損を計算するため、二次側に流れる電流 I_2' を算出する。

(1)、(2)式に誘導機の二次入力 P_2 、軸動力 P_M の式を示す。これらの式を用いて、(3)式に示す二次電流 I_2' を計算する。

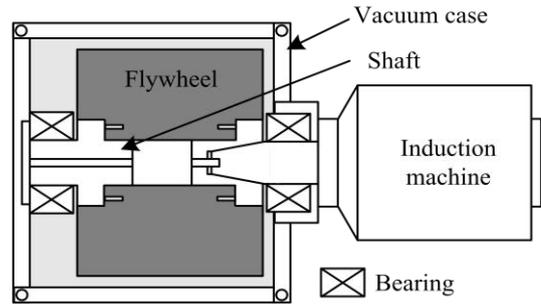


図1 フライホイールの構成
Fig. 1. Configuration of the Flywheel.

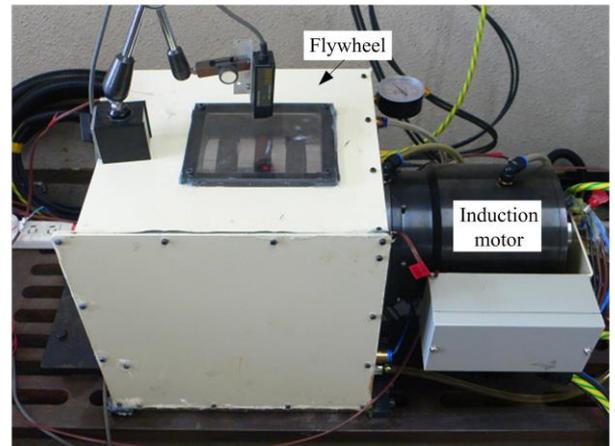


図2 実際のフライホイールの構成
Fig. 2. Actual Flywheel system.

表1 フライホイールシステムの仕様
Table 1. Specification of Flywheel unit.

Outward form	58.25×34×35.3cm
Diameter of FW	30cm
Weight of FW	110kg
Rated speed of rotation	15000rpm
Accumulated energy	1.53MJ
Motor capacity	43.4kVA

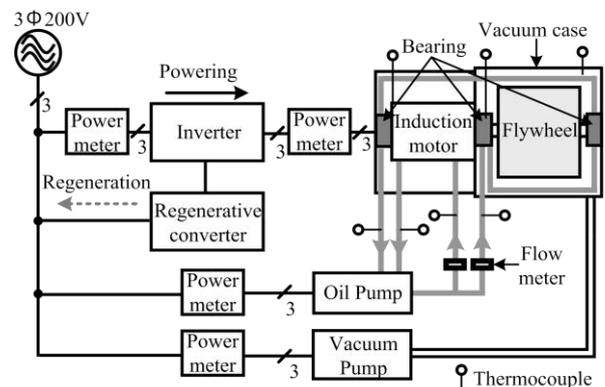


図3 フライホイールシステムの構成
Fig. 3. Configuration of the Flywheel system.

表 2 モータパラメータ

Table 2. Motor parameters.

Stator resistance R_1	19.0mΩ
Rotor resistance R_2'	21.6mΩ
Stator leakage inductance L_1	0.114mH
Rotor leakage inductance L_2'	0.117mH
Magnetizing inductance L_{1h}	2.09mH

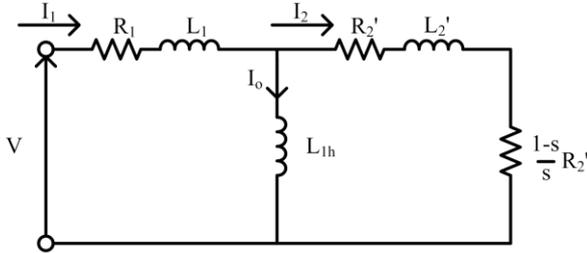


図 4 基本波に対する誘導機の等価回路
Fig. 4. Fundamental equivalent circuit.

ここで、機械損を軸動力 P_M としている。

$$P_2 = 3 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$P_M = (1-s)P_2 = 3 \frac{1-s}{s} R_2' I_2'^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$I_2' = \sqrt{\frac{P_M}{3 \frac{1-s}{s} R_2'}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、すべり s は実測データの同期速度と回転子の回転速度から(4)式によって計算した。

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (4)$$

以上の式より求めた二次電流と、実験で測定した一次電流を用いて基本波に対する銅損 P_{Cl} を計算する。ここで、銅損は(5)式によって計算する。

$$P_{Cl} = 3R_1 I_1^2 + 3R_2' I_2'^2 \dots\dots\dots (5)$$

(3・2) 高調波成分に対する損失の計算

インバータを用いて誘導機をPWM駆動する場合、高調波電圧が誘導機に印加される。その結果、高調波成分による損失が発生する⁽⁶⁾。

図5にインバータと誘導機の接続図を示す。ここでは、PSIMを用いたシミュレーションによって、誘導機に印加される線間電圧 V_{uv} の高調波成分を解析し、これによって発生する損失を算出する。

図6にキャリア周波数 16kHzにおける出力電圧の高調波成分の解析結果を、図7に高調波成分に対する誘導機の一相分の等価回路を示す。PWM駆動によって発生する高調波成分は、基本波成分と比較して十分に高い周波数領域であるため、基本波に対する等価回路における励磁インダクタンス L_{1h} を無視することができる。また、高調波成分に対するインピーダンスは漏れインダクタンス成分が支配的にな

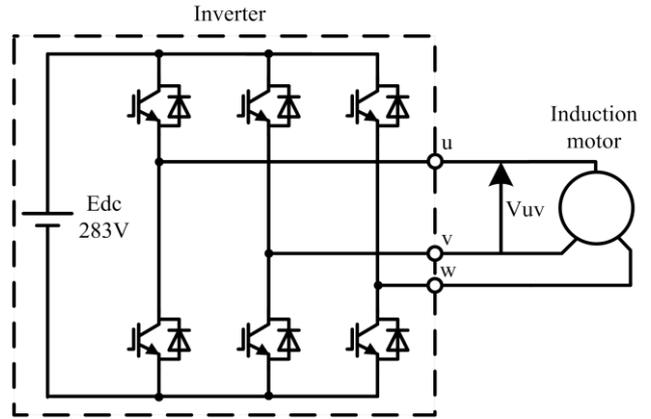


図 5 シミュレーションの接続図

Fig. 5. Connection diagram of the simulation.

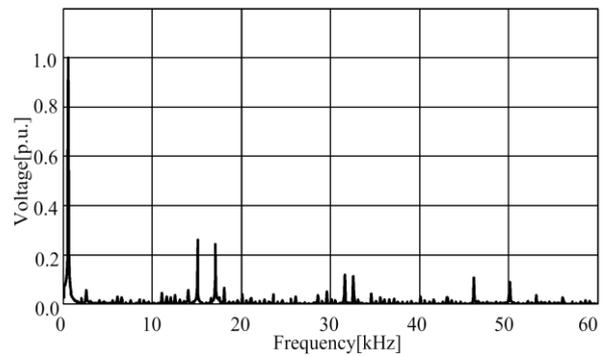


図 6 線間電圧の高調波解析結果

Fig. 6. Harmonic analysis of the line voltage.

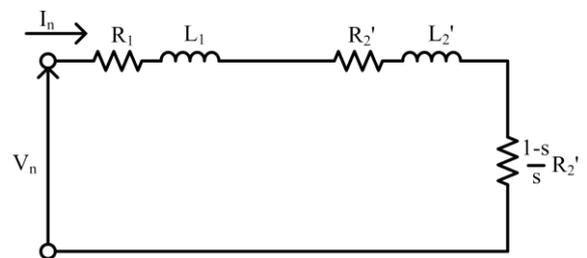


図 7 高調波成分に対する誘導機の等価回路

Fig. 7. Harmonic equivalent circuit.

るため、各高調波成分によって発生する高調波電流は(6)式で得られる。

$$I_n = \frac{V_n}{\omega_n (L_1 + L_2')} \dots\dots\dots (6)$$

高調波成分に対するすべり s は 1 と見なせるため、図7における出力を表す要素である $R_2'(1-s)/s$ を無視することができる。したがって、高調波成分に対する損失は(7)式によって求められる。

$$P_n = 3(R_1 + R_2') I_n^2 \dots\dots\dots (7)$$

図8に電氣的損失の解析結果を示す。ここで、誘導機の鉄損は全電氣的損失から基本波に対する銅損と高調波成分に対する銅損を引いた値としている。解析結果より、電氣的損失 2.83kW のうち、92.8%が鉄損であり、電氣的損失の大

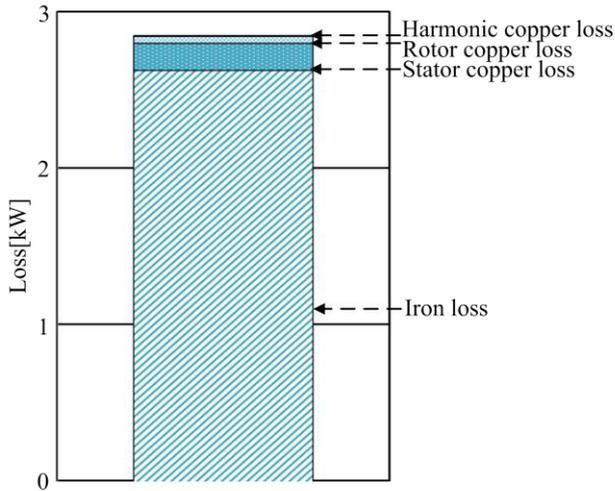


図8 電氣的損失の解析結果

Fig. 8. Electrical loss analysis.

部分を占めることがわかる。また、高調波成分に対する損失は1.74Wと非常に小さく、全体の損失に対して無視できる程度の損失であることがわかる。

4. 機械的損失の解析方法

〈4・1〉 風損の解析

製作したシステムにおけるFW表面とその周囲にある気体との摩擦損失、すなわち風損 Q_w は、容器内部の形状が複雑であるため、単純な計算式で算出することは難しい。そこで風損の解析手段として数値流体力学(CFD)を利用した解析を行った。解析に用いたのは非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetra (ソフトウェアクレイドル製)である。図9に作成したCFDによる流体解析には3D-CADによる解析モデルを示す。実際のシステムを忠実に再現したモデルでは解析の複雑化、計算時間の増大などがあるため、解析と無関係な部品や機構を省き、単純化したものとした。

図10にメッシュ生成したモデルを示す。これは、解析を行うために、FW密閉容器内の流体の流れる空間を細かく刻んだモデルである。また、表3に解析条件を示す。流体の流れは乱流とし、乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデルによる計算を行った。初期条件として流体の圧力には30kPa、温度には25℃を与えた。また、境界条件としては外側の流体表面には静止壁を、FW表面は流体メッシュ速度と壁面速度を一致させるようにした。FWの回転に関しては、FWそのものだけでなく流体をFWの中心軸まわりに回転させ、相対的にFWを回転させた。回転速度は8000r/minから15000r/minまで1000r/minごとに変化させ、各回転速度において定常状態となるまで解析を行った。

図11に回転速度15000r/minにて解析を行った際のFWまわりの流体の流れおよびFW表面の圧力を示す。図12に解析により得られたFWの回転軸まわりの粘性力を示す。回転速度8000r/minにおいて風損は0.27kWである風損と回転速度の関係を関数化した結果、(8)式が得られた。

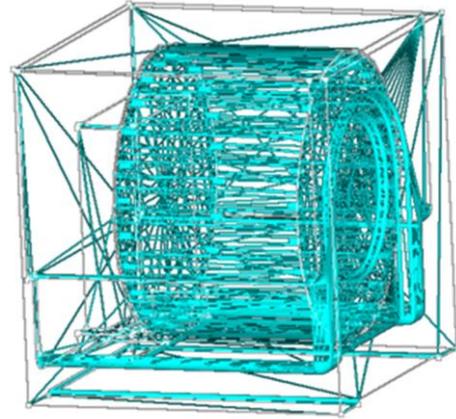


図9 CFD解析用3D-CADモデル

Fig. 9. 3D-CAD model for CFD analysis.

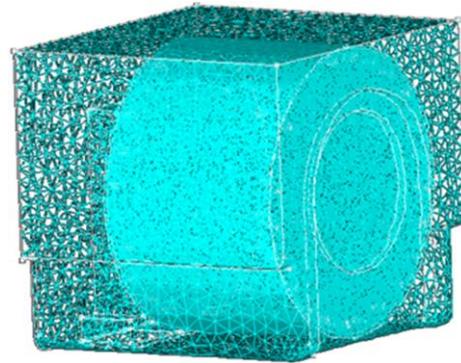


図10 解析用メッシュ

Fig. 10. Numerical grid.

表3 CFDによる解析の条件

Table 3. Condition of CFD analysis.

Fluid	Air	Pressure	30kPa
		Temperature	25℃
		Density	0.348kg/m ³
		Viscosity	18.3μPa·s
Numerical Grid	269494 elements		
Rotation Speed	8000~15000r/min		

$$Q_w = 1 \times 10^{-8} \omega^2 - 1 \times 10^{-4} \omega + 0.527 \dots \dots \dots (8)$$

〈4・2〉 ベアリング損の解析

ベアリング損失 Q_b は、ベアリングの摩擦モーメント M および回転速度 n から(9)式によって得られる。

$$Q_b = 1.047 \times 10^{-4} n M \dots \dots \dots (9)$$

また、摩擦モーメントは荷重に無関係な摩擦モーメント M_o と、荷重に依存する摩擦モーメント M_l に分離可能で、それぞれ次のように表される。

$$M = M_o + M_l \dots \dots \dots (10)$$

$$M_o = f_o \times 10^{-7} (\nu n)^{2/3} d_m^3 \dots \dots \dots (11)$$

$$M_l = f_l P d_m \dots \dots \dots (12)$$

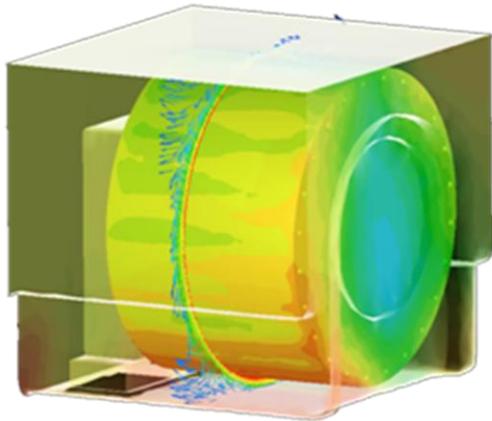


図 11 流れと圧力の解析結果

Fig. 11. Flow and pressure visualization.

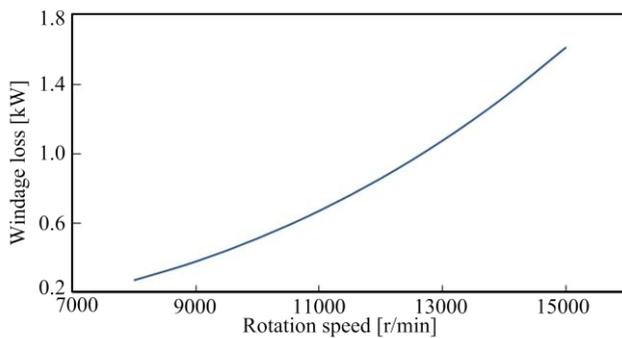


図 12 風損と回転速度の関係

Fig. 12. Windage loss vs rotation speed.

ここで、 f_0 は軸受の形式と潤滑方法に依存する係数、 ν は潤滑油の粘度、 d_m は転動体のピッチ内径、 f_1 は荷重の大きさおよび、方向に依存する係数、 P は軸受にかかる荷重である。

図 13 に製作した FW システムのベアリングにかかる荷重を示す。ベアリングは FW 両端に各 2 個、モータ端に小型のものが 1 個設置されている。表 4 に各ベアリングの損失計算に用いた値を示す。

図 14 に表 4 をもとに算出したベアリング損失と回転速度の関係を示す。これより、回転速度の増加に伴い、ベアリング損失は増加し 15000r/min においては 0.52kW となることわかる。

図 15 に解析によって得られた風損とベアリング損の和、すなわち機械損と回転速度の関係を実験結果と比較したものを示す。これより、実測値と解析値がよく一致していることが確認できる。

5. 損失解析結果

図 16 に損失解析結果を示す。これより、15000r/min 定常回転時における全損失 4.8kW のうち、33.5% が FW 風損、54.8% が誘導機の鉄損であった。したがって、FW 高速回転時において、FW 風損と誘導機の鉄損が支配的となる。FW 風損は、FW 密閉容器内の真空度が低いことにより発生する。試作一号機では、密閉容器内が絶対圧力で 30kPa であり、風損を低減するには密閉容器内の真空度をさらに向上させ

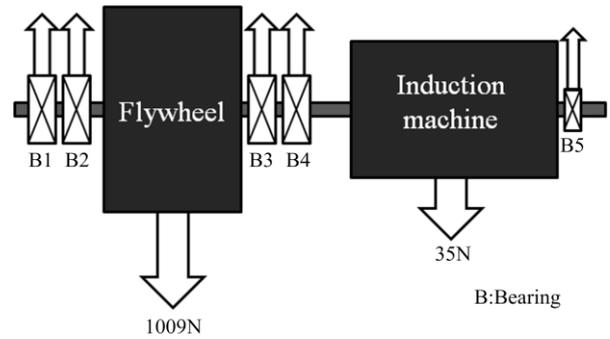


図 13 回転部の荷重

Fig. 13. Load of rotating devices.

表 4 ベアリング損失の計算条件

Table 4. Conditions for bearing loss calculation.

Bearing 1,2	f_0	1
	f_1	0.000566
	Viscosity ν	20mm ² /s
	Pitch diameter d_m	60mm
	Rotation speed n	8000~15000r/min
Bearing 3,4	Load P	300N
	f_0	1
	f_1	0.000566
	Viscosity ν	20mm ² /s
	Pitch diameter d_m	60mm
Bearing 5	Rotation speed n	8000~15000r/min
	Load P	166N
	f_0	1
	f_1	0.000566
	Viscosity ν	20 mm ² /s
Bearing 5	Pitch diameter d_m	48.5mm
	Rotation speed n	8000~15000r/min
	Load P	112N

の必要がある。また、誘導機の鉄損は一次周波数の増加に伴い増加する。したがって、鉄損を低減するためには現在よりも低い回転速度で同等のエネルギーを貯蔵する設計に変更する必要がある。

6. 二号機の設計に向けて

現在、FW システムの高効率化を目的に FW 試作二号機を製作中である。このシステムでは、試作一号機で問題となった密閉容器内の真空度を向上させる。具体的には、一号機で 30kPa であった真空度を絶対圧力で 1kPa まで向上する。また、回転体の再設計を行い、二号機では 9000r/min 時に 3.0MJ を貯蔵する仕様とする。これにより、一号機において 15000r/min 時に貯蔵されるエネルギー 1.5MJ を、6364r/min で実現できることになり、FW 風損のみならず誘導機の鉄損も軽減できることが予想される。図 17 に試作二号機の機械損解析結果を示す。このシミュレーションは、密閉容器の真空度を 1kPa として計算している。解析結果より、二号機における 1.5MJ 貯蔵時の風損は 40.0W となり、一号機と比較して 1/40 に低減できることが予想される。また、ベアリング損は 351W となり、回転体の重量が増加により一号機と

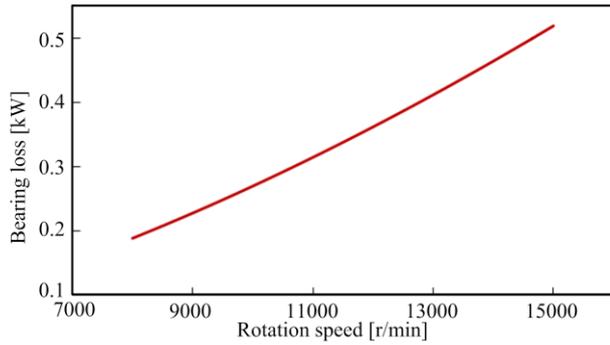


図 14 ベアリング損失と回転速度の関係

Fig.14. Bearing loss vs rotation speed.

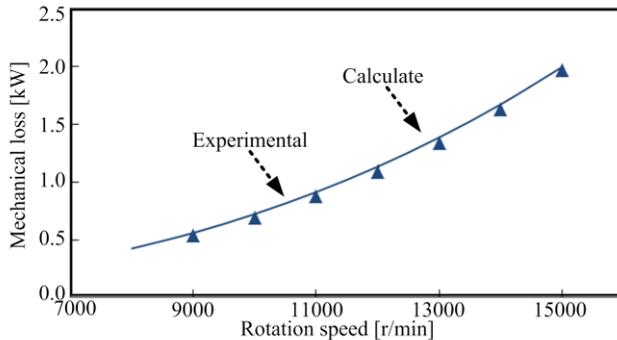


図 15 機械損と回転速度の関係

Fig.15. Mechanical loss vs rotation speed.

比べて増加している。二号機の 1.5MJ 貯蔵時の機械損を合計すると、391.3W となり、一号機の機械損に対して 20.1% に低減できることが予想される。また、二号機では 1.5MJ 貯蔵時に、一次周波数が一号機の 0.424 倍の 212Hz となる。鉄損はヒステリシス損と渦電流損に分離でき、高周波領域では、周波数の二乗に比例する渦電流損が支配的となる。そのため、ヒステリシス損を無視すると、鉄損を一号機の 18.0% に低減できることが予想される。

7. まとめ

本論文では、15000r/min、1.5MJ の FW システムを製作し、特性解析を行うため定常損失の分離を行った。解析結果より、製作した FW システムにおける各種損失を明らかにした。まず、機械的損失と電氣的損失を分離するため、フリーラン試験を行い 15000r/min 定常回転時において、機械的損失と電氣的損失を分離した。機械的損失は、数値解析を行うことで FW 風損が機械損全体の 81.9% を占めることを確認し、電氣的な損失解析では、測定電流から誘導機の銅損を算出することで、誘導機の鉄損が全電氣的損失の 92.3% を占めることを確認した。これより、FW 高速回転時は、FW 風損と誘導機の鉄損が支配的となることが明らかとなり、FW システムの高効率化には、これらの損失を低減する必要があることを確認した。今後は、一号機を改良した試作二号機の損失解析を行い、解析結果を用いて FW システムに最適なモータの設計を行うことを予定している。

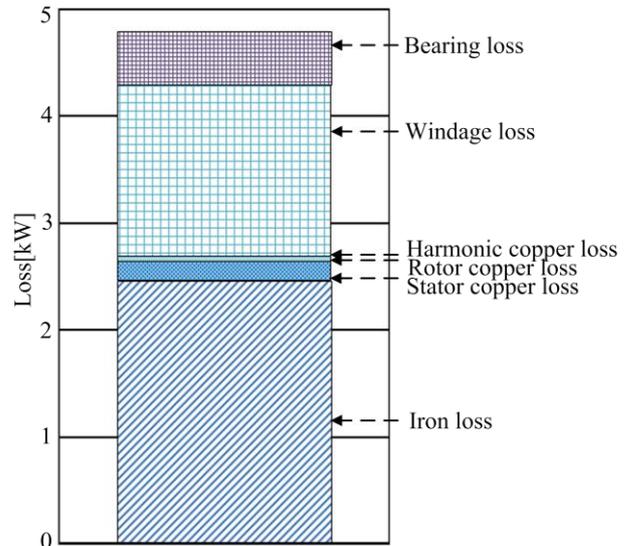


図 16 損失解析結果

Fig. 16. Loss analysis results.

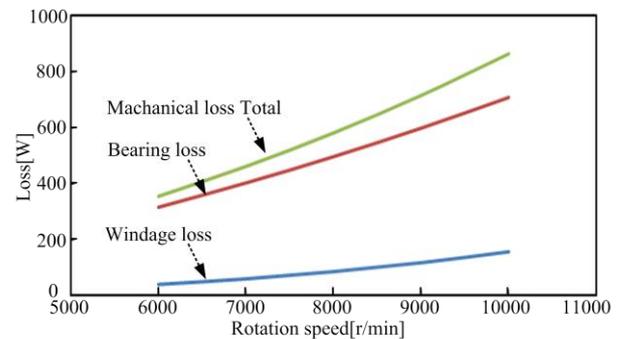


図 17 試作二号機の機械損解析結果

Fig. 17. Mechanical loss analysis of a new flywheel.

文 献

- (1) 黒崎他:「普及版環境と省エネルギーのためのエネルギー技術大全」, エヌ・ティー・エス
- (2) 矢後賢次, 腰一昭:「風力発電の系統連系システム」, 富士時報, Vol.78, No.6(2005)
- (3) 村井啓介, 春名順之介, 伊東淳一, 山田昇:「エネルギーキャッシュシステム用高速回転型フライホイールの定常損失評価」, 平成 22 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, p.121(2010)
- (4) T. Fujimori, Y. Hirano, N. Yamada, J. Itoh: "Characterization of mechanical battery for energy cache systems", No.0117-1(2011)
藤森崇起, 平野佑太, 山田昇, 伊東淳一:「エネルギーキャッシュシステム用機械式バッテリーの特性評価」, 日本機械学会北信越支部 48 期総会・講演会講演論文集, No.0117-1 (2011)
- (5) 村上岩範他:「小型高温超電導浮上フライホイールの開発」, 日本 AEM 学会誌, vol.17, No.1, pp.132-137(2009)
- (6) T. Ogura, J. Itoh: "Evaluation of Total Loss of Both an Inverter and Motor Depending on Modulation Strategies", SPC-09-184, LD-09-074(2009)
小倉工, 伊東淳一:「インバータの運転方式に応じた総合損失の評価」, 半導体電力変換リニアドライブ合同研究会, SPC-09-184 LD-09-074(2009)