

鉄道用超電導フライホイールの開発



吉永 孝*¹



西 健太郎*²

Development of superconducting flywheel energy storage system for railway system

Takashi YOSHINAGA*¹, Kentaro NISHI*²

*¹ Assistant Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

*² Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

JR East is working on the effective utilization of regenerative energy. As part of this, a superconducting flywheel energy storage system has been installed. Since this device levitates and be supported in a non-contact way, it can be expected to improve efficiency of maintenance. In this development, we measured the characteristics of the levitating and rotating superconducting flywheel, and the charging and discharging characteristics of the superconducting flywheel, and confirmed stable operation. After that, we will start a demonstration test when operating trains are running and verify the introduction effect.

●**Keywords:** Flywheel Energy Storage System (FESS), Superconducting, Regenerative energy

*¹JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 副主幹研究員

*²JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 主幹研究員

1. はじめに

JR東日本グループでは、環境目標「ゼロカーボン・チャレンジ2050」を策定し、エネルギーを「ためる」フェイズの新たな技術として、超電導技術を応用した超電導フライホイール蓄電システムの開発を行っている。

本稿では、本開発にて製作した試験装置の概要、営業線での実証試験のため実施した各種試験について報告する。

2. 超電導フライホイール蓄電システムの概要

2・1 本システムの概要

超電導フライホイール蓄電システムとは、図1に示すように装置の内部にある大型の円盤(フライホイール)を回転させることによって、回生電力を運動エネルギーとして貯え(充電)、必要に応じて運動エネルギーを再び電力に変換(放電)するシステムである。超電導フライホイールへ貯蔵するエネルギー量 E [J]は、質量 M [kg]、半径 r [m]のフライホイールが回転角速度 ω [rad/s]で回転する場合に(1)式のように示すことができ、フライホイールの質量、直径、回転数により貯蔵エネルギー量の設計が可能である。

$$E = 1/4 \times M \times (r \times \omega)^2 \quad (1)$$

なお、フライホイールは荷重を2点支持するため、軸受のメンテナンスに費用がかかる課題があった。そこで、超電導技術を活用し非接触支持することで、メンテナンス性の向上が期待できる超電導フライホイールに着目し、当社での研究開発に着手した¹⁾。

2・2 超電導フライホイールの主な構成

超電導フライホイールの構造を図2に示す。本フライホイールは縦型であり、装置下部にある超電導磁気軸受によって磁気浮上させ、非接触で支持している。主要な装置を以下に示す^{2), 3)}。

①発電電動機

フライホイールと連結させて加速・減速し、回転エネルギーと電気エネルギーを相互に変換する。

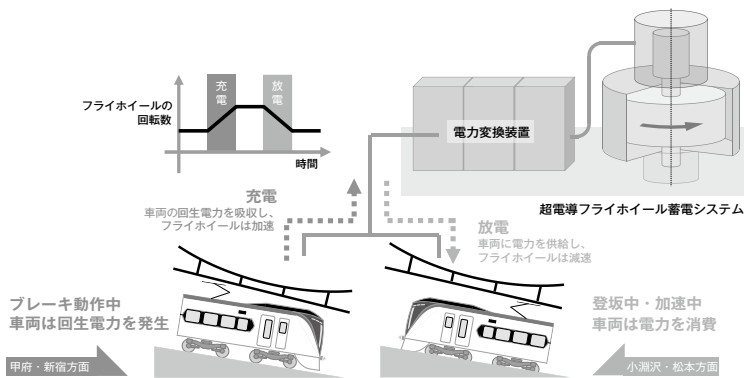


図1 超電導フライホイール蓄電システム動作原理

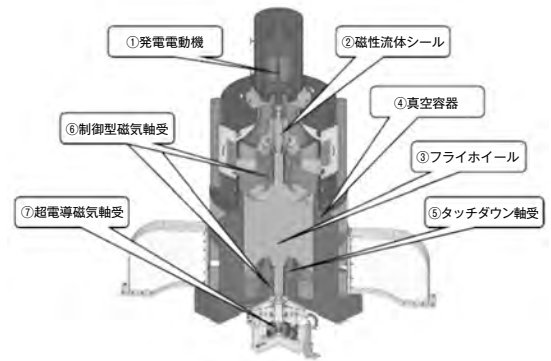


図2 超電導フライホイールの構造

②磁性流体シール (MFS: Magnetic Fluid Seal)

真空容器内のローターと大気空間内の発電電動機を接続し、真空と大気を隔離させて真空状態を保ちつつ、回転動作を伝達する。

③フライホイール

15tの大型ローターであり、再生エネルギーを回転エネルギーとして貯蔵する。

④真空容器

フライホイールを内蔵し、回転抵抗 (風損) を低減させるため、容器内を真空状態にしている。

⑤タッチダウン軸受 (TDB: Touch Down Bearing)

超電導磁気軸受が機能喪失して浮上を保てなくなった場合でも、フライホイールが安全に停止するまで、荷重を回転支持させる。

⑥制御型磁気軸受 (AMB: Active Magnetic Bearing)

電磁石の吸引力を利用・制御することで、フライホイールの軸にかかる水平方向の力を非接触で支持する。

⑦超電導磁気軸受 (SMB: Superconducting Magnetic Bearing)

SMBに内蔵する超電導コイルの強力な磁界と、回転軸に内蔵する超電導バルク体との磁気反発力により、フライホイールの重量を鉛直方向に非接触で支持する。

2・3 本システムの主な構成

(1) システム構成および充放電の流れ

超電導フライホイール蓄電システムの構成を図3に示す。車両の再生電力は、蓄電システム内の電力変換装置 (チョッパ装置、VVVF装置) を通じて直流を交流へ電力変換し、超電導フライホイールにて回転エネルギーとして貯蔵している。また、放電は逆の経路で力行車両に電力を供給する。

(2) 電源構成

超電導フライホイールは浮上状態を維持するため、超電導コイルへ電源を供給し続ける必要があることから、以下のようにシステムに供給する補機電源を冗長性の高い構成とした。

- ① 常用からの電源供給: 高圧電灯回線 (AC6,600V) より常用電源を供給する
- ② 停電時の電源供給: 停電時には直流高圧母線 (DC1,500V) からチョッパ装置・補助電源装置にて電力変換を行い、予備電源を供給する
- ③ 両系停電時のバックアップ: 両系の電源が喪失した場合には、フライホイールの慣性力にて発電した電力を供給し、電源供給可能な下限回転数まで低下した後は、重要機器 (図3) にUPS等の蓄電池から電源供給を行う。

(3) 安全対策

装置の異常が発生した場合は、回転するフライホイールを安全に停止させる必要がある。そのため、異常時にはシステム内の制動抵抗器によりエネルギーを放出し、超電導コイルの励磁を継続して浮上状態を保ちながら、フライホイールを停止させるシーケンスを構築した。また、緊急停止を要する場合は、タッチダウン軸受によってフライホイールを回転着地させると共に、制動抵抗器によりエネルギーを放出して停止させるシーケンスも構築した。

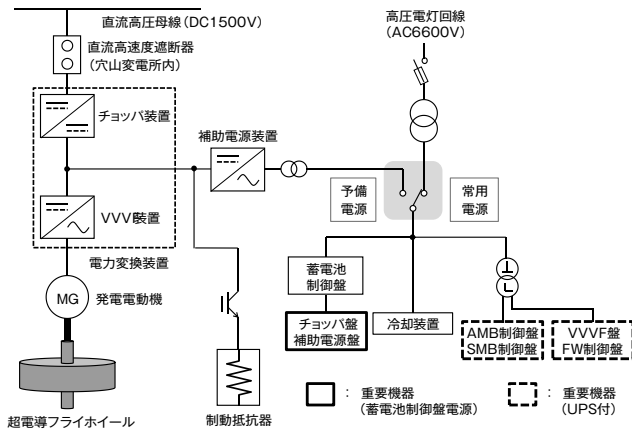


図3 蓄電システムの構成



図4 超電導フライホイール蓄電システムの外観

2・4 設置工事の概要

回生電力の有効利用を目的とした電力貯蔵装置は、列車間で回生電力の融通がされにくい線区を選定することが望ましい。そのため、本システムの特性を生かせる連続勾配区間をターゲットとし、用地の確保が見込めた中央本線穴山変電所を設置場所として選定した⁴⁾。超電導フライホイールの設置にあたっては、組み立てを容易にするため、建屋は可動式テント方式とし、現地での最大地震動（L2地震動）に対応するため、試験装置本体を免震装置上に設置した（図4）。

3. 試験概要

3・1 主な試験項目

営業線での実証試験の実施にあたり、事前の単体機能確認のほか、鉄道に関する技術基準に基づく機能確認を実施した⁵⁾。主な試験項目の中で、本稿では(2)、(3)、(5)の各試験結果について紹介する。

- (1) 電気試験（接地抵抗測定・インターロック確認試験・操作連動試験・保護連動試験など）
- (2) 単体浮上試験
- (3) 単体浮上回転試験
- (4) 変電所からの直接充電試験
- (5) 誘導障害試験（試験列車との充放電試験）

3・2 単体浮上試験

超電導コイルおよび超電導バルク体が超電導状態になるまで冷却を行った後、超電導コイルを励磁しフライホイールの浮上試験を実施した。連続浮上した試験結果を図5に示す。浮上高さは自動制御によって所定の高さで位置しており、かつコイル温度などの監視項目は基準値内であったことから、長時間浮上でのシステムの安定性を確認することができた。

3・3 単体浮上回転試験

フライホイールを浮上した状態で単体の回転試験を実施した。営業線接続前の単体機能確認であるため、直流き電回線からエネルギーを供給することができないことから、VVVF装置一次側に接続した仮設発電機から電気エネルギーを供給し、フライホイールの加速を行った。一方で、減速は本システム内の制動抵抗器にて行った。

本試験は段階的な昇速試験、高速域での連続回転試験、繰り返し加減速試験の順序で実施した。図6における $2,100\text{min}^{-1}$ の連続回転試験では、回転軸の水平方向の振動を制御するAMBの振幅値は十分に小さく、その他監視項目も基準値内であり、安定した回転を確認することができた。この試験結果を踏まえて、安定に浮上回転できる運用回転数を定め、営業線での実証試験を行った。

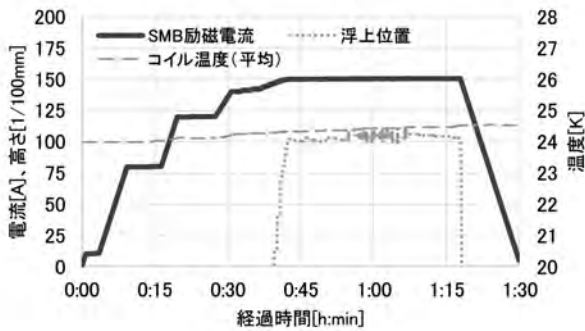


図5 単体浮上試験結果

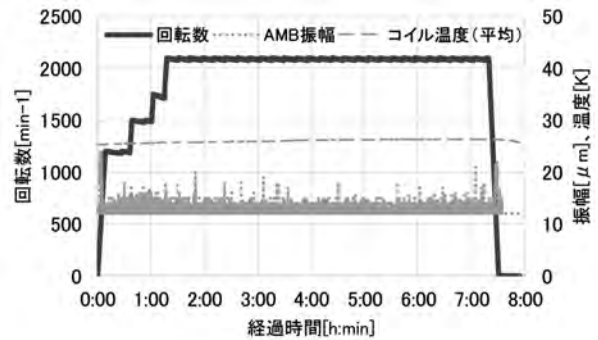


図6 単体浮上回転試験 (2,100min⁻¹連続回転) 結果



図7 帰線電流測定

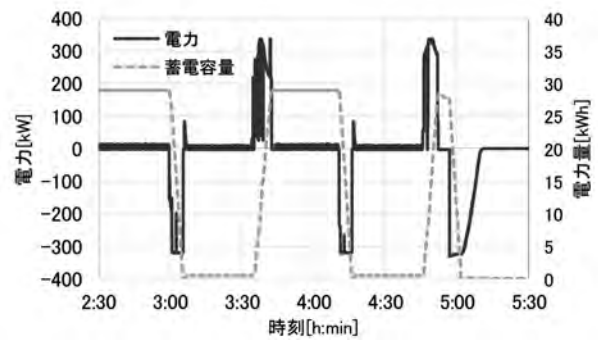


図8 試験列車との充放電特性

3・4 誘導障害試験 (試験列車との充放電試験)

本システム内にある電力変換装置のスイッチング制御によって発生するノイズが、信号設備の軌道回路・地上子に影響無いことを確認するため、夜間に試験列車E353系9両編成(5M4T)を穴山変電所付近にて走行させた誘導障害試験を実施した。変電所内の帰線ケーブルにロゴスキーコイルを設置し(図7)、試験列車と超電導フライホイールとの間での充放電による帰線電流の測定と、試験列車の力行・回生電流の特性を総合的に評価した結果、本システムの機能に問題無いことを確認した。また、試験列車との充放電試験の検証では、試験列車1回の走行で、定格値である電力330[kW]、電力量29[kWh]の充電および放電の動作を確認した(図8)。

以上の試験を踏まえ、本システムが試験列車との充放電が問題無く実施できたため、営業列車での実証試験を開始した。

4. おわりに

本稿では、回生電力のエネルギーを「ためる」新たな技術として、超電導技術を応用した超電導フライホイール蓄電システムの開発の概要について報告した。

今後営業列車走行時の充放電試験において、省エネ効果の検証、本システムの安定性などについて検証する予定である。

参考文献

- 1) 吉永孝他、鉄道用超電導フライホイール蓄電システムの実証試験に向けた検討、鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、No.S34-1(2019)、pp.473-476
- 2) 山下知久他、超電導フライホイール実証機のキーテクノロジー、低温工学・超電導学会誌、Vol.54、No.5(2019)、pp.359-367
- 3) 宮崎佳樹他、鉄道応用を目指した大荷重対応超電導磁気軸受の開発、低温工学・超電導学会誌、Vol.54、No.5(2019)、pp.381-387
- 4) 吉永孝他、超電導フライホイール蓄電システムの実証試験、日本鉄道技術協会誌、Vol.62、No.11(2019)、pp.43581-43584
- 5) 吉永孝他、超電導フライホイール蓄電システムの製作および開発試験、日本鉄道技術協会誌、Vol.65、No.9(2022)、pp.46361-46364、