

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

超電導磁気軸受を用いた フライホイールで電力をたくわえる

“電力をたくわえる”技術のことを一般に蓄電技術とよびますが、いっそうの省エネルギーのため、あるいは太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及に向けて、さまざまな蓄電技術の開発が進められています。物体を回転させることでエネルギーをたくわえるフライホイールもそのひとつです。ここでは、超電導技術を応用した新しいタイプのフライホイール蓄電システムについて紹介します。



小方 正文
Masafumi Ogata
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
室長
[専門分野] 低温工学,
超電導技術



宮崎 佳樹
Yoshiki Miyazaki
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
副主任研究員
[専門分野] 低温工学,
超電導技術



山下 知久
Tomohisa Yamashita
浮上式鉄道技術研究部
主任研究員(上級)
[専門分野] 低温工学,
超電導技術

はじめに

省エネルギー化や再生可能エネルギーの普及のために、なぜ蓄電技術の開発が必要なのでしょう。電力のもととなる電流は、簡単にいうと電線の中の電子の流れのことですが、電子が流れている状態をそのままの形で保持することは技術的にも大変難しいので、電力を自在に活用するためには別のエネルギーの形に一度変換してからたくわえる必要があるのです。たとえば現在広く普及しているバッテリーを用いる場合は、余った電力をバッテリーに充電しておき、必要となった時にバッテリーを放電させることで電力をリサイクル使用できるので省エネルギーに役立てられます。また、太陽光発電や風力発電の発電電力は、気象条件による変動の幅が大きいため不安定になる傾向があります。そこで、発電電力が急に増えた分はバッテリーに充電しておき、反対に減ったときはバッテリーから放電させて不足分を補うことで、発電電力を平滑にして安定化する効果が期待できます。このようにバッテリーは電力を化学エネルギーに変換してたくわえ、必要に応じて化学エネル

ギーを電力に再変換する蓄電技術ということができます。

蓄電技術を導入することで電力の活用の幅は大きくひろがります。また活用したい電力の特性に応じて、蓄電技術にはさまざまな方式が提案されています。その中でも、電力を回転の運動エネルギーに変換してたくわえる方式がフライホイール蓄電です。次にフライホイール蓄電について説明します。

フライホイール蓄電

フライホイールとは、日本語で「弾み車(はずみぐるま)」の意味です。身近な例では、陶芸用のろくろや、足踏み式のミシンには、外から多少の力が加わった場合でも安定した回転状態を保持するために、回転軸には重量のある円盤状の「はずみぐるま」が直結されています。このような、回転の運動エネルギーをたくわえる「はずみぐるま」の原理を応用したものが、フライホイール蓄電です。

フライホイール蓄電の運転イメージを図1に示します。フライホイールの回転軸の端部には発電電動機が取り付けられ、発電電動機には電力変換器が

接続されています。これにより、余った電力があるときは、電力変換器で発電電動機を駆動してフライホイールの回転数を上昇させて、回転の運動エネルギーに変換してたくわえることができます。これは充電に相当します。また反対に電力が必要なときは、回転しているフライホイールの運動エネルギーを使って発電電動機で発電し、電力変換器で電力に再変換して取り出すことができます。これは放電に相当します。

フライホイール蓄電は、このような簡単な原理にもとづく蓄電技術なので、たとえばフライホイールが貯蔵するエネルギーは、そのときのフライホイールの回転数がわかれば、直ちに知ることができます。フライホイール蓄電の貯蔵エネルギーは次の計算式(1)で表されます。

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

ここで、Mはフライホイールの質量、rはフライホイールの半径、 ω はフライホイールの回転数を表します。回転数から貯蔵エネルギーを正確かつ瞬時に把握できること、また回転数をゼロにする、すなわち回転を止めるだけで貯蔵エネルギーを完全に放出できることも、ほかの蓄電技術にはないフライホイール蓄電特有のメリットといえます。その他のメリットとしては、バッテリーにみられるような繰り返し充放電にもなまって貯蔵エネルギー量が減少していく性質がないことや、貯蔵エネルギー量は質量や半径といったフライホイールの材質や形状によって、また充放電電力は発電電動機の性能によってそれぞれ独立に決定できるので蓄電システム導入先の電力事情に合わせた自由度の高い設計が可能であることがあげられます。このような特性をもつフライホイール蓄電は電気鉄道の現場にも導入され20年以上の運用実績を有しています¹⁾。

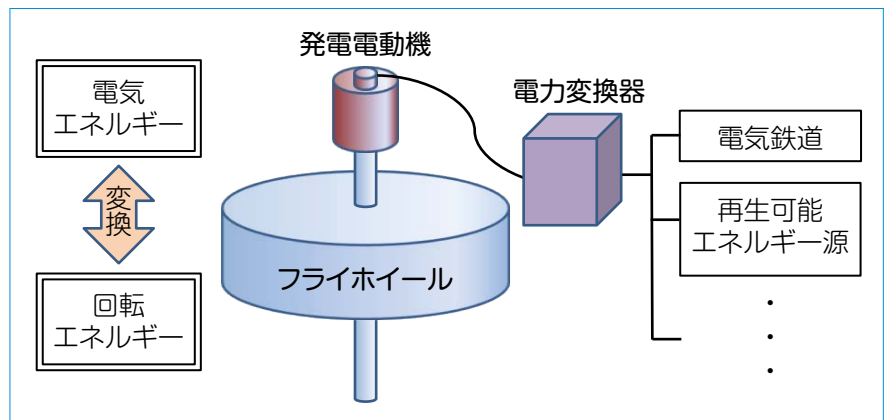


図1 フライホイール蓄電の運転イメージ

課題解決のための新技術の提案

しかしながら、フライホイール蓄電にも課題がありました。計算式(1)からわかるように、貯蔵エネルギーを増やすためには、フライホイールを重たくし、大きくして、高速で回転させる必要がありますが、このときにもっとも負荷がかかるのがフライホイール回転軸の軸受部です。軸受とは、回転軸にかかる荷重を支持する機械部品ですが、荷重や回転数が大きくなると軸受の接触回転部分の摩擦発熱や発熱にともなうエネルギーロスも大きくなってしまいます。これまでも接触回転抵抗をできるだけ減らしたり、大きな荷重も負担できるように工夫された軸受が用いられてきましたが、接触回転部分がある限り、細部まで分解して摩擦部品を交換するなどの定期メンテナンスが欠かせませんでした。この点が機械式蓄電システムであるフライホイール蓄電の大きな課題となっていました。

そこで、もしフライホイール回転軸を非接触浮上させることができたとしたらどうなるのでしょうか。まず、摩擦や発熱、エネルギーロスといった接触回転にともなう影響をなくすることができます。さらに、軸受寿命の半永久的な延長や定期メンテナンスの大幅な軽減が期待できます。非接触浮上を実現する軸受としては磁気軸受がありますが、電磁石が鉄などの磁性体を引き付ける力を回転軸の浮上に応用する従来

方式の磁気軸受では、発生できる浮上力が小さいため、大型のフライホイール回転軸の非接触浮上には適用することができませんでした。しかし近年の超電導技術の進歩にともない、超電導材料を磁気軸受に導入した超電導磁気軸受が開発され、浮上力を大幅に向上させた小型で非接触浮上可能な軸受がフライホイール蓄電にも導入されるようになりました。次に鉄道総研が開発した超電導磁気軸受について説明します。

超電導磁気軸受

超電導磁気軸受は非接触浮上を実現する磁気軸受の一種ですが、浮上力向上のため、軸受の固定側か回転側に超電導材料を組み込むさまざまな工夫がなされてきました²⁾。この中で鉄道総研では、超電導リニアの研究開発で培った超電導技術・低温技術を応用し³⁾、超電導材料を軸受の固定側と回転側の両側に用いるまったく新しい構成の超電導磁気軸受を提案・開発しました。開発した超電導磁気軸受の構成を図2に示します。図2のように軸受の回転側には超電導バルク体を、固定側には希土類系の高温超電導線材を巻線した超電導コイルを配置します。冷却により電気抵抗がゼロになった超電導コイルに電流を流すと、コイルが強力な磁場を発生し、その磁場が超電導バルク体に作用してバルク体には大きな反発力が生じます。これがこの超電導磁

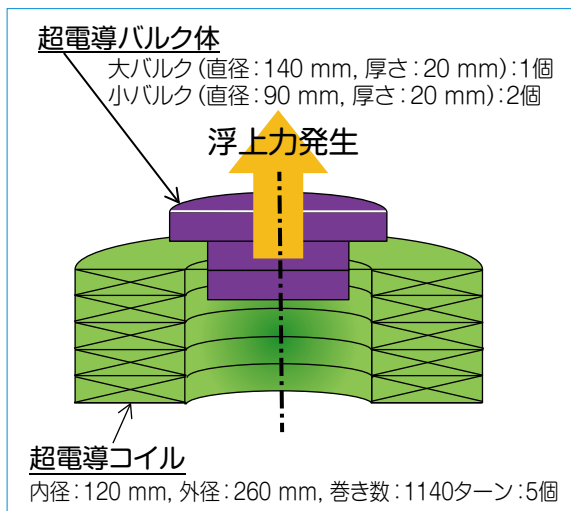


図2 超電導磁気軸受の構成

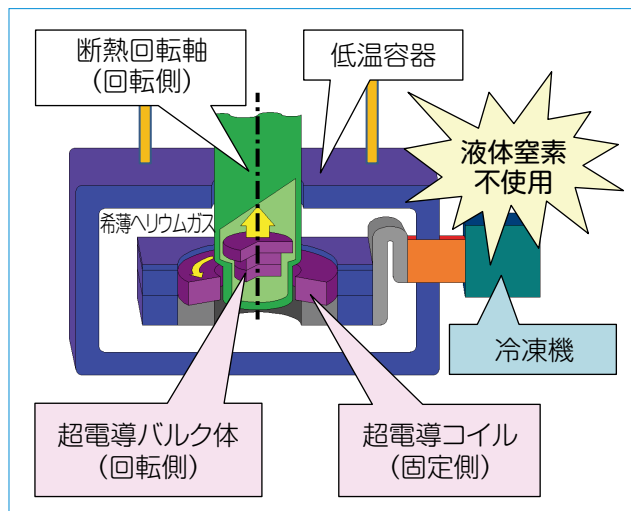


図3 超電導磁気軸受の冷却構成

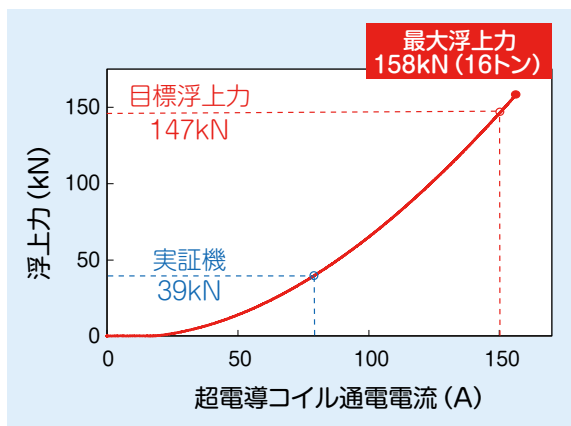


図4 高温超電導磁気軸受の浮上力試験結果

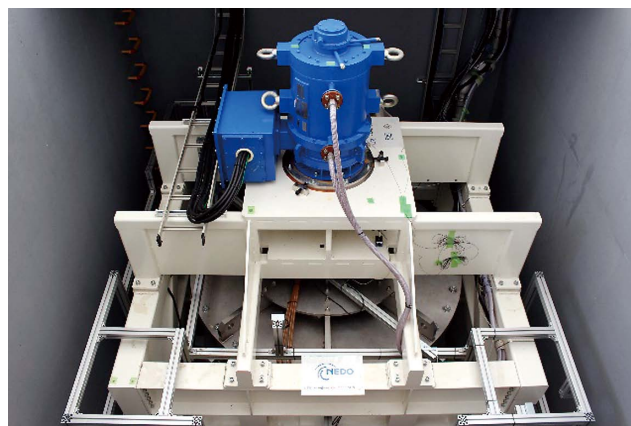


図5 超電導フライホール実証機の外観

気軸受の浮上力発生メカニズムです。また発生する浮上力の大部分は大バルクが負担し、小バルクは回転軸が本来の回転中心からずれたときに元に戻そうとする案内力を負担する働きをします。超電導磁気軸受の浮上ギャップは、超電導コイルの上面と大バルクの下面との間隔となりますが、20mmを実現しました。なお超電導バルク体の“バルク”とは“塊”を意味し、全体が希土類系元素の酸化化合物の結晶でできており、冷却することで外からくる磁場を跳ね返す超電導の性質を示します。

図3には超電導磁気軸受の冷却構成を示します。固定側の超電導コイルには冷凍機が接続され、冷凍機を起動するだけで徐々に冷却されてコイルは超電導状態となります。このように、液体窒素のような冷却用の液体を使わな

い冷却方式とすることで運用時の簡便化を図りました。一方、回転側の超電導バルク体は、超電導コイルに対して非接触浮上する部品であることから、冷凍機接続による冷却方式は使えません。そこで、超電導コイルと超電導バルク体を収納する低温容器の内部に大気圧の約一万分の一となる約10Paの希薄ヘリウムガスを封入し、ヘリウムガスを超電導コイルと超電導バルク体との間の熱伝導媒体とすることで、超電導バルク体を超電導コイルとほぼ同等の温度まで冷却する独自の手法を採用しました。このガスヘリウムの封入圧力約10Paは、超電導コイルと超電導バルク体との間の熱伝導のためには十分で、かつ回転体に対するヘリウムガスの抵抗も十分に小さいことを満足する圧力範囲を実験と解析で検討して

決定しました⁴⁾。

このようにして開発した高温超電導磁気軸受に対して、荷重変換器を用いて浮上力を測定する試験を実施しました。試験結果を図4に示します。超電導コイル、超電導バルク体ともマイナス243℃以下まで冷却した後、超電導コイルへ通電したところ、156Aにおいて目標浮上力147kN(質量15000kgの浮上が可能な力に相当)を約7%上回る158kNの大きな浮上力性能を確認しました⁵⁾。以上のように本超電導磁気軸受は、超電導コイルと超電導バルク体を用いることにより軸受部分が一辺数十cmの立方体に収まるほどコンパクトでありながら、158kNの大浮上力が発生可能であり、高温超電導材料の適用で冷却のための消費電力の低減や断熱構造の簡素化を実現しました。

超電導フライホイール蓄電システムの開発例

この超電導磁気軸受を使用した超電導フライホイール蓄電システム実証機が、山梨県甲府市の米倉山太陽光発電所に設置されています。晴れたり曇ったりすることで不安定になりやすい太陽光発電電力を平滑化して再生可能エネルギーの品質向上を図ることが実証機設置の目的です。

本実証機の外観を図5に、構成を図6に示します。直径1440mm、質量約4000kgの鋼製フライホイールを内蔵し、フライホイール回転軸の下端に超電導磁気軸受、上端に発電電動機が設置されています。本実証機による太陽光発電電力の平滑化検証の例を図7に示します。太陽光発電出力が安定しているときに実証機が充電され、太陽光発電出力が低下すると実証機が放電して太陽光発電電力を示す連系点電力が平滑化されることを確認しました。

おわりに

地球環境保全の重要性が高まるなか、鉄道分野においても一層の省エネルギー化に対する取り組みが求められています。超電導フライホイール蓄電が電気鉄道の回生電力の有効活用などに向けた地上設置型蓄電システムのひとつとして普及することを目指し、引き続き、超電導磁気軸受の耐久性検証、低コスト化などの技術開発を続けていきます。

米倉山太陽光発電所の超電導フライホイール蓄電システム実証機は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けて、鉄道総研、クボテック(株)、古河電気工業(株)、(株)ミラプロ、山梨県企業局の5者が共同開発したものです。[RRR]

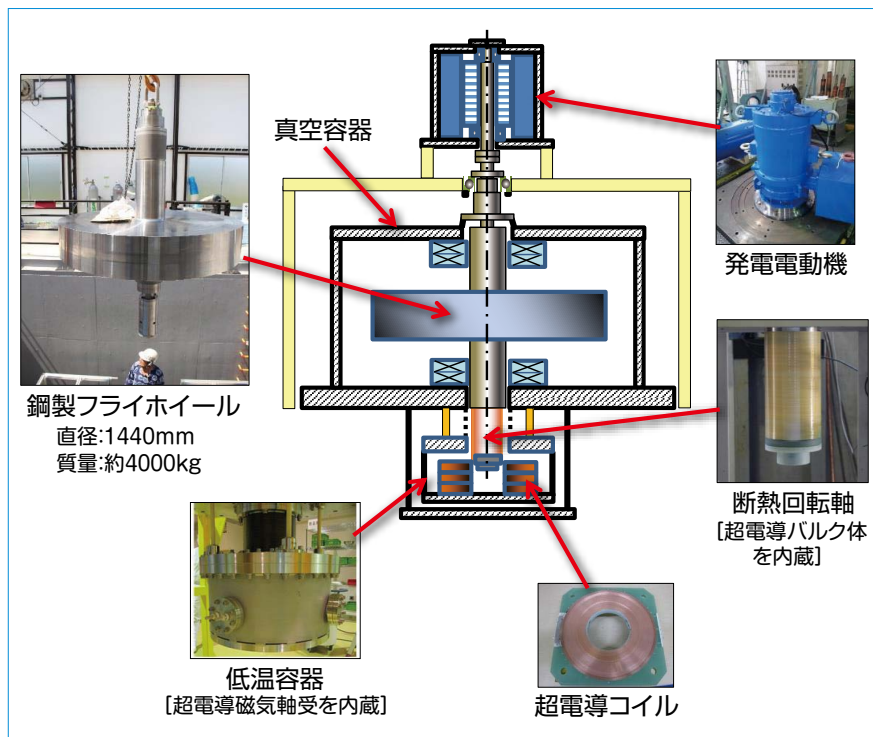


図6 超電導フライホイール実証機の構成

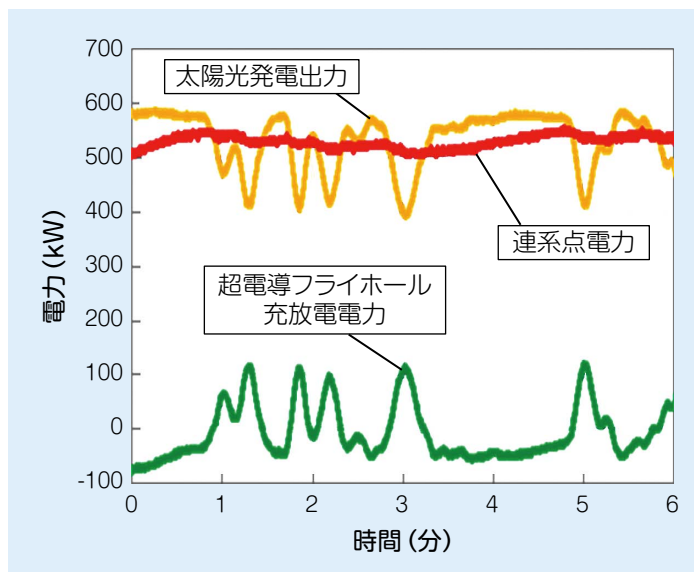


図7 超電導フライホイール実証機による太陽光発電出力の平滑化検証例

文献

- 1) 島津登志成, 橘浩司: 京浜急行電鉄(株) 納め電車線用フライホイール発電電動機, 三菱電機技報, Vol.63, No.8, pp.662-665, 1989
- 2) 清野寛, 米津武則: 超電導を使用したエネルギー貯蔵, RRR, Vol.66, No.3, pp.26-29, 2009
- 3) 水野克俊, 杉野元彦, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導線材を用いた起磁力700kA実機大コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.5-10, 2017
- 4) 清野寛, 長嶋賢, 田中芳親, 中内正彦: フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.35-40, 2008
- 5) 宮崎佳樹, 水野克俊, 小方正文, 山下知久, 長嶋賢: 鉄道用フライホイール向け超電導磁気軸受の信頼性評価試験, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.23-28, 2019