

特集

電力システムと電力機器の省エネルギー

電力貯蔵方式における省エネルギー

Saving Energy in Flywheel Energy Storage System

河村 寿三*
Toshimi Kawamura

1 まえがき

電力貯蔵，一般にエネルギー貯蔵技術は，古来からあるもの及び現在研究中のものも含めると相当な種類にのぼる。しかし容易に電力に変換し得るものとして把えれば，機械的なエネルギーの形態で貯蔵するもの，電気的磁気的な形態，電気化学的な形態，燃料の形とするもの等が考えられる。

機械的なものの一つは位置エネルギーで，代表的且つ大規模なものは揚水発電所である。圧力エネルギー例えば圧縮空気を使うものも外国では可成り研究されている。また，運動エネルギーを用いるものは，ここに詳述するフライホイールが代表的なもので，回転のエネルギーとして貯蔵する。揚水発電級のもの¹⁾²⁾から家庭用のも³⁾まで，また特殊なFRPを用いたスーパーフライホイールの研究も相当に進んでおり，その弱点とされる繊維方向と直角方向の成分を如何にカバーするか，その構成面からもアプローチされている⁴⁾。更に磁気軸受も永久磁石を用いるもの³⁾など種々提案されている。

電気的磁気的なものは，コンデンサが瞬時大電力供給に用いられており，更に超電導コイルが，他システムを含めて，最も貯蔵損失の少ないものの一つとして提案されている⁵⁾。その他電気化学的又は化学的方式として二次電池方式，水素のようなエネルギー媒体を効率よく，且つコンパクトに貯蔵する方法等，研究が意欲的に進められている。

いずれにしても，電力貯蔵という見地からすると，できるだけ電力に近い形態がまず変換損失が少ないという点で望ましいこと，貯蔵密度当たりの媒体コストが安価なこと，次に貯蔵中に徐々にエネルギーが失われないようなもの乃至は配慮を必要とすること等が評価のポイントとなる。その他システム構成の問題や社

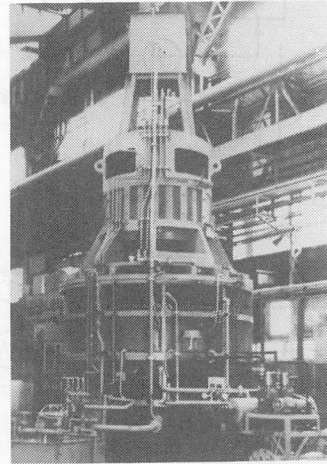


図-1 工場試験中の電車線電力蓄勢装置

会性から見た設置単位の大きさ，設置場所の問題等も十分検討の要がある。

フライホイールにエネルギーを貯蔵すること自体は，別に新しいことではない。古くはエンジンや機械プレスのトルク脈動の吸収，瀬戸物成形用のろくろ，電気バスや地下鉄への応用，フライホイールを用いたおもちゃ，イルグナ式電源装置，非常用電源始動装置等が一般的なものである。また次代エネルギーと言われる核融合試験装置でも，巨大なコイルに大電力を投入するために電力設備も巨大化する傾向があり，このピークカットのためにフライホイール発電機が実用されている⁶⁾。

しかしもっと積極的にフライホイールをエネルギー対策として利用しようとする研究が可成り進められており，前述のスーパーフライホイール，それを搭載した自動車⁷⁾，揚水発電所級への応用等の研究成果が，大学，各種研究機関，電力会社，大企業等で得られつつある。

ここに紹介するのは，日本船舶振興会昭和54年度の助成を得て，京浜急行と三菱電機が共同で開発した

* 三菱電機(株) 神戸製作所開発部参事 工学博士
〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1-2

電車線電力を蓄えるフライホイール装置で、日本鉄道技術協会の開発テーマである「電車線電力蓄勢装置の開発」を受託して行ったものである^{8)~14)}。

なお、鉄道への応用研究は同様なものが米国 DOT の報告に見られる¹⁵⁾。

2 電力貯蔵の必要性

電車（一般には電気車）が近代化、あるいは蒸気機関車などよりも省エネルギーになるとして登場したが、その動力システムは直流変電所、直流架線および直流電動機から成っている。しかし、電車の要求する電力は一般に変動が激しく、平均値に比べてそのピークは大きいのが普通である。古くは蓄電池を変電所に設置されていたこともある。再び蓄電池が見直されているが、研究はこれからである。

一方、電車運行エネルギーを更に節減しようとする試みは昭和40年頃より東京地下鉄（営団）、国鉄、阪神電鉄などで始められた。これは制動時に車両を持っている運動エネルギーを、単にブレーキシューや発電抵抗の所で消費して熱に変えてしまうのではなく、できるだけ架線に送り返して他の力行車に供する方式で、回生制動と呼ばれていてチョップ制御が主流である。変電所の効率化や車両の軽量化が同時に進められていることは勿論である。この方式は、チョップ制御が一般化するに従って急速に普及しつつあり、最初は制御のノッチレス化と、トンネルの温度上昇の抑制が目的¹⁶⁾であったが、最近では省エネルギーがその旗印となっている。

この回生制動による運行エネルギーの低減は大きく、後に述べるシミュレーション手法を用いた結果では30%、場合によってはそれを越える。しかし同時に、丁度他に力行車がないときの電力は十分生かせないことが指摘され、甚だしいときには回生失効（回生制動をかけても負荷がないために架線電圧が上昇し、制限値を越えると直ちに回生回路は遮断される）を生ずる。回生失効を生じて空気ブレーキに切り換えられるので車両運行には差支えないが、省エネルギーには反する。従ってこの余剰の回生電力を吸収する試みは以前からなされており、インバータで交流電力に変換して電鉄付帯電力に用いる、所謂回生変電所が既に稼働している。しかしこの電力を商用電力網に供給することは許されていない。従ってインバータの有効なのは、付帯電力の比較的多い地下鉄のような場合で、効外電車などでは必ずしも有効でない。

このフライホイール装置はこのような事情に鑑みて開発されたもので、余剰の回生電力を一旦フライホイールに蓄えておき、必要に応じて力行車に供給するものである。

また、このような装置にあらかじめ電力を蓄えておき、力行電力の多いときにこの装置からも電力を供給すると、この装置は変電所のピークカット、或いは架線電圧降下補償、更には事情で変電所を設置できない場合にもその代替をすることすら可能となる。

この設置の動作は架線電力の消費と密接な関係にあり、次に述べるようなシミュレーションにより、動作の解析、適正化、電力収支等を明らかにすることができる。

2.1 運行・電力シミュレーション

シミュレーションは列車群の運行を求めるものと、それが架線から供給される電力に関するものから成る。列車運行を求めるものはランカーブとも呼ばれていて、線路の条件と車両の運行条件を入れて実行する。列車は一般に各停、急行、特急などがあり、回生可能車は起動停止の頻繁な各停に充てられる。列車の運行とともに列車の必要とする電流が得られ、その概念図は図-2に示すようになる。この図では各停と特急の2車種の例を上げた。この電流パターンの代数和を求めると変電所電流となる。実際には変電所の実効抵抗や架線抵抗などが複雑に関係するが、ここではこれらの影響を無視してシミュレーションする。

その実例が図-3に示すもので、京浜急行運行ダイヤ（平日用No.137）で上大岡を中心とし、杉田一井土ヶ谷間で13時29分から13時49分までについて求めた。この間には各停・特急各2本、急行1本がそれぞれ上り下りに含まれる。

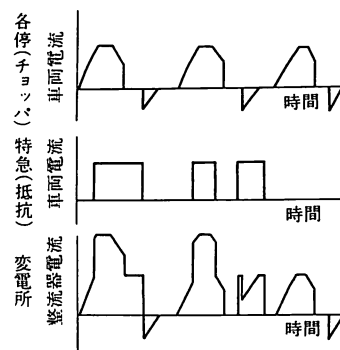


図-2 電力シミュレーション概念図

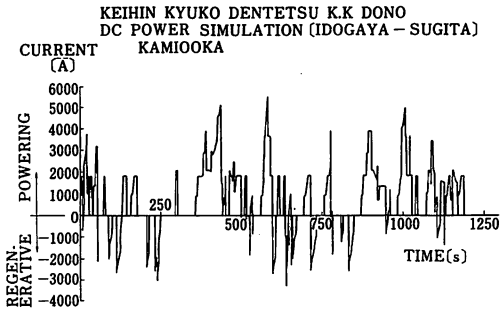


図-3 電力シミュレーション結果

このシミュレーション結果を見ると、可成りの回生電力が余剰となっており、何も対策されなければこの電力は無駄となる可能性がある。これをフライホイール装置に吸収し、力行電力の必要ときに放出すればよい。電力の放出は変電所のレギュレーションとの分担で決定される。このような考え方で電力収支を求めると表1のようになった。この計算では後述のフライホイール装置の補機などの運転電力もすべて算入されている。回生電力の流入が放出を上回る場合は、フライホイールに蓄えられる一方となるが、このようなことがこの運転サイクル中に1回以上あり、このときの最大蓄積量は15 kWh (=54 MJ)であった。

2.2 フライホイール装置の諸元

開発機の設計諸元は上のシミュレーションの結果に基づいて決定され、表2のようになった。既ちフライホイールに電力を出し入れする発電電動機——これをフ

ライホイール発電機という——には750kWの直流機を選び、これを架線に直結した。

フライホイールとフライホイール発電機とは機械的に直結され、立軸形とし、フライホイールの回転損を最小限とするために、フライホイールを真空ケーシング内に収容し、スラスト磁気軸受により吸引懸架した。

3 フライホイール装置の概要

開発機の構成は、フライホイール装置本体、その制御装置及びその補機類とから成っており、そのシステムの概要は図-4に示すようなものである。

表1 電力シミュレーション結果

項目	結果
架線より装置へ流入する回生電力合計	75.8 kWh (平均 227 kW)
装置に蓄勢される蓄勢量総量	69.1 kWh
装置より電車線へ供給される放勢量総量	59.6 kWh
装置の補機並びに待機電力量	8.3 kWh
有効放勢量	51.3 kWh
総合効率	68%
1回の最大蓄勢量	15 kWh

表2 フライホール式電車線電力蓄勢システム主要性能

項目	数値
有効エネルギー蓄積量	15 kWh
フライホール基底回転速度	800 rpm
フライホール最高使用回転速度	1600 rpm
電車線電圧(公称)	1500 V
フライホール発電機容量	750 kW

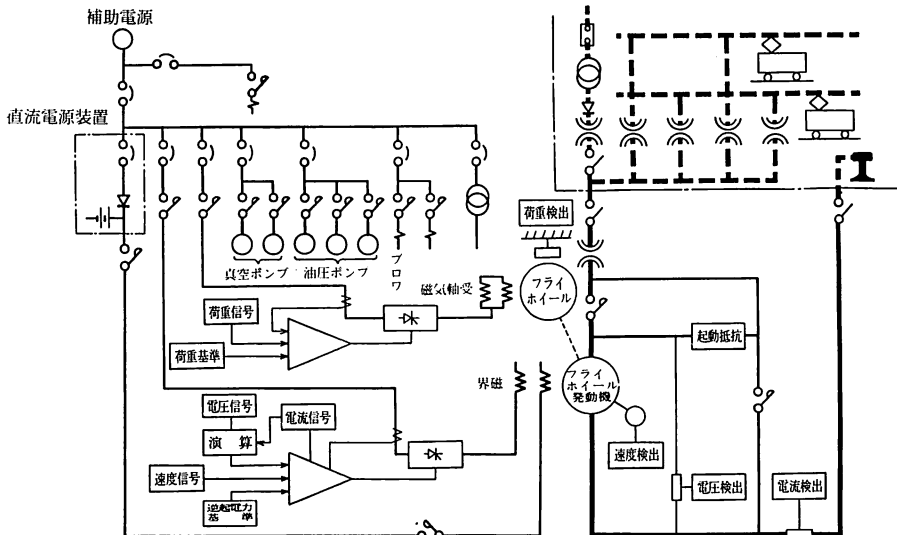


図-4 フライホイール式電車線電力蓄勢システム

3.1 フライホイール装置本体

本体の構造を図-5に示す。フライホイール発電機は上部に、下部にフライホイール、機械式軸受は最上部に案内軸受、中央部に回転重量を支える（磁気軸受不動作時は全回転重量を支持する）複列コロ軸受、下部にはジャーナル形の案内及び静圧パッド形のスラスト軸受を配した。下部にすべて油膜式の軸受を用いたのは、万一の回転振動発生時にこれをダンピングさせるためのもので、若干の損失の発生は止むを得ない。

フライホイール発電機の基底回転速度は800rpmで、これから最高運転速度1,600rpmとの間で15kWhの動力を貯蔵できる。装置本体の仕様は表3のようになっている。

このような装置の設計上の問題点は、回転損の低減は勿論であるが、フライホイール本体の遠心力並びにその変動に対する応力が十分疲れ限度の中に入っていること、及び一次危険速度が最高運転速度よりも十分に高くなっていることである。

フライホイール本体の材質は表3に示すように現在のところ容易に市場で入手できる最強の疲れ強度のものを用い、周速約170m/sで運転することとした。また、回転振動に関しては図-6に示すように各質量と弾性の分布モデルを考えて数値解析によって危険速度を求め、一次危険速度として2,006rpm、実用時最大振幅10μm程度と判明した。これは実際に回転させたとき

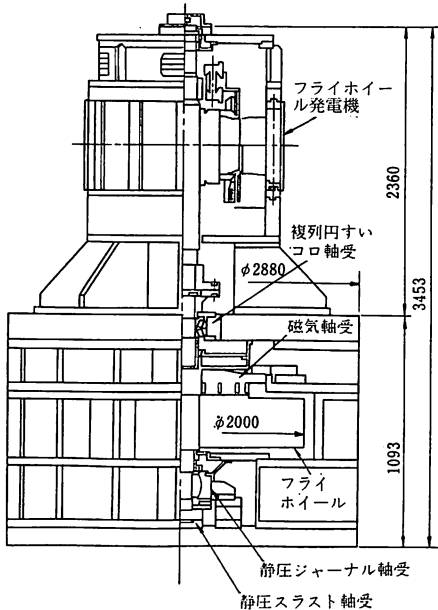


図-5 電車線電力蓄勢装置構造図

表3 フライホイール装置の仕様

(1) ケーシング構造	立軸形円筒状構造物
(2) 軸受構成	複列円すいころ軸受 静圧ジャーナル軸受 磁気軸受および静圧スラスト軸受
(3) 磁気軸受	全回転部重量の80%以上懸架可能
吸引力	ロードセル出力による帰還制御可能
制御	2 kW 以下
消費電力	
(4) 真空軸シール装置	油膜方式
方式	フライホイール上・下軸各1個
取付	到達真空度 0.1 atm 以下
到達真空度	
(5) フライホイール	
GD ² , 寸法	20.5 t·m ² , 外径 2000
円板材質	3.5% NCrMoV 鋼
軸材質	SF 60
最高使用回転速度	1600 rpm の 5% 高
最大入力トルク	フライホイール発電機定格トルクの 6 倍

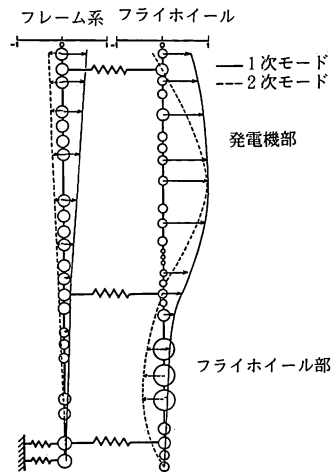


図-6 回転振動解析モデルと振動モード

の経験とよく一致している。

3.2 制御装置

制御装置は、装置の始動・停止、フライホイール発電機の運転制御、磁気軸受の制御、フライホイール発電機及び制御装置内機器の保護を行うもので、その全体構成を図-7に示す。

フライホイール発電機は、前述のように直流機であるので界磁制御でその動作を制御できる。直流機が回

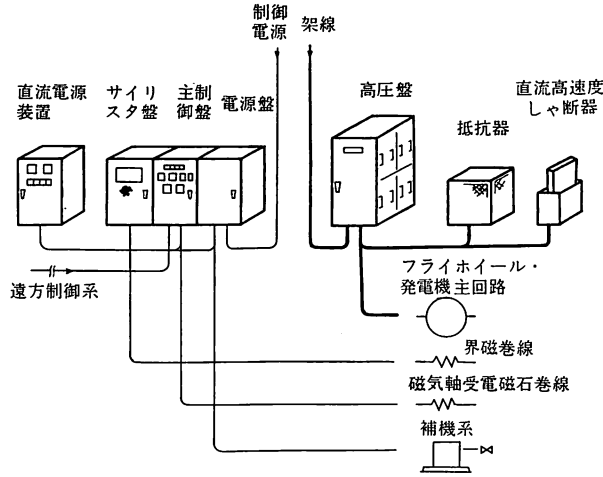
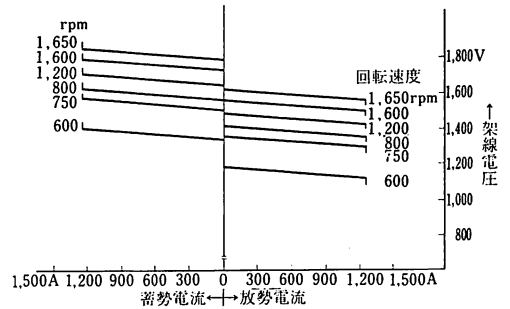


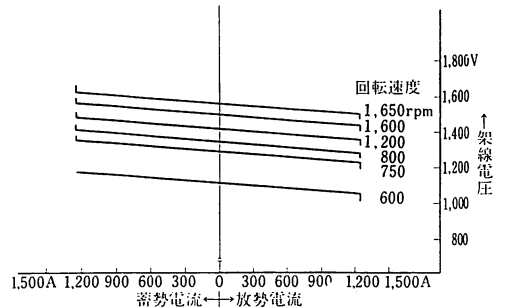
図-7 制御装置全体構成図

転していると電機子誘導起電力を生じ、これが架線電圧と対抗している。架線電圧が高くなると（回生の状態）電流が流入し、逆に低くなると（力行の状態）流出する。実際には回転速度が電力の吸収又は放出に伴って上昇又は低下するので、これに合わせて界磁を弱め又は強めることによって電機子誘導起電力を一定に保つようにする。更に、レギュレーションを加えたり、電機子誘導起電力を回転速度に応じて弾力性を持たせたり、また電流ゼロ近辺で外部特性に電圧不感帯を設けるなどの制御パラメータを与えている。このようにして得られた外部特性の一例を図-8に示す。図-8(a)が電圧不感帯を有する場合で、このようにすると、回生で流入した電力は暫くフライホイールに保持されるようになり、回生電力貯蔵に適する。これを回生電力吸収モードと名付ける。一方この不感帯を除くと図-8(b)のようになり、適当に制御パラメータを調整することにより架線電圧に余裕のあるときに最高運転速度に達し、力行車が来ると電力を供給するようになる。これを架線電圧低下補償モードと名付け、変電所のピークカット若しくは変電所の代替の可能性も出てくる。

磁気軸受は、同心円状の巻線構造を持ち、フライホイール本体に対抗して配置されていて、常時は回転重量の95%を吸引懸架するように励磁電流を制御している。この制御は、一般に吸引ギャップ又は吸引力を検出することによりなされているが、この場合は吸引荷重を3つのロードセルで受けて帰還制御するものとした。帰還定数を適当に選んで安定化し、同時に多少の回転振動（上下振動）に対してダンピングがかかるようになっている。



(a) 回生電力吸収モード



(b) 架線電圧低下補償モード

図-8 電圧-電流特性

4 今後の課題

以上に電車線電力を貯蔵するフライホイール装置の開発機の概要について述べた。この開発機の開発要素は、フライホイールを真空収納しかつ磁気吸引懸架することにある。その意味では開発の目的は十分達せられ、今後の低損失フライホイールの可能性を立証した

が、更に電車線電力蓄勢システムとして完成させて行くには、いくつかの課題が残されているものと考えられる。即ち

- (1) 装置としての各部の信頼性の向上
- (2) 同じく保全性の改善
- (3) 更に低損失化(フライホイール発電機を含めての)
- (4) 更に小形軽量化(フライホイールの高速化)
- (5) 電力収支のより精密な解析
- (6) 現地試験とシミュレーションを重ねることにより、更に制御パラメータを最適化すること
- (7) より高度なシステム・ソフトの修得

これらの課題は技術の進歩に俟つものもあろうし、我々のフィジビリティスタディの密度を上げるだけで達成できるもの、各方面からの御叱正によるもの等、種々のレベルのものが考えられるが、今後できる限りの努力を重ねて、エネルギー対策機としての玉成を期したい。

5 あとがき

電車線電力蓄勢装置の開発とその課題につき展望を試みたが、我が国の乏しい資源を有効に生かすための手段はまだまだある、というのが実感である。

この装置の開発に当っては、まず運輸省の方々に、開発の計画から設置並びに試験に至るまで行政上種々御指導頂き、工技院機械技研島村部長及び松野課長にはアドバイスとお励ましを頂いた。協会に設置された委員会では協会、国・私鉄の関係者に熱心な御討論を頂き、また東大曽根助教授には格別の御指導を賜ることができた。特に委員長として東大植村教授、並びに開発の仕様と場を提供願った京浜急行丸山取締役には

一方ならぬ御指導御鞭撻を頂いた。この紙上を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 工業技術院：新エネルギー技術シーズの研究(昭52)
- 2) 小貝他：系統電力貯蔵におけるフライホイールの応用、三菱電機55 No.7 p.490(昭56-7)
- 3) A.R.Millner et al. : System Design, Test Results, and Economic Analysis of a Flywheel Energy Storage and Conversion System for Photovoltaic Applications. Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Conf. 14th (1980)
- 4) 機械技術研究所：フライホイール関連技術の現状と問題点(昭51)
- 5) 増田：電力貯蔵技術のひみつ、日刊工業(昭56)
- 6) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状(昭56)
- 7) 機械技術研究所：フライホイールカーに関する調査研究報告書(昭51)
- 8) 日本鉄道技術協会：電車線電力蓄勢装置の開発研究報告書(昭55-3)
- 9) 河村他：フライホイールの電鉄変電所への応用、昭55電気四学会連大 S11-3
- 10) 星野他：フライホイール式電車線電力蓄勢システム、第17回鉄道サイバネ国内シンポ517 p.225(昭55)
- 11) 木村他：フライホイール式エネルギー蓄積装置の電鉄変電所への応用、計測と制御20 No.3 p.374(昭56-3)
- 12) 河村：フライホイール式電車線電力蓄勢システムの開発、JREA 24 No.4 p.13670(昭56-4)
- 13) 丸山他：電車線電力貯蔵におけるフライホイールの応用、三菱電機技報55 No.7 p.494(昭56-7)
- 14) N.Maruyama : Flywheel Type Electric Railway Energy Saving Substation. JREA 21 No.2 p.22 (1981, 英文版)
- 15) Lawson, et al. : Wayside Energy Storage Study. Vol. 1 Summary, U.S.DOT (1979-2)
- 16) 石原：地下鉄電車の特異性と試作電車の構想について、三菱電機技報42 No.11 p.1411(昭43-11)

