

鉄道における電力貯蔵技術の開発状況

奥井 明伸* (鉄道総合技術研究所)

Trend of Energy Storage System for Railway Transportation

Akinobu Okui* (Railway Technical Research Institute)

The electrical energy is easily controllable compared with other energy. In addition, the electrical energy has an advantageous feature for environment. The electrical energy is also used as the driving energy of the rolling stock in railway. On the other hand, to supply the electric energy with stability, the power supply system needs to have a sufficient supply capacity for demand. The feature of the electric power used in electric railways is that the peak power is large and the average power is low. This is a factor of the power cost increase. Moreover, electric railway is increasing effective use for the resurrection energy of the vehicle and the necessity of the voltage descent measures. In addition, an electric railway needs effective use of regenerating energy from rolling stock for energy conservation, and the measure against a voltage drop. To apply the energy storage system to electric railways is one method to solve these problems. This paper describes the example of application and future view of the energy storage system for DC-electric railway in Japan.

キーワード：電気鉄道、電力貯蔵装置、バッテリーポスト、リチウムイオン電池、ニッケル水素電池、フライホイール、電気二重層キャパシタ、超電導コイル

(Keywords : Electric railway, Energy storage system, Battery post, Lithium Ion battery, Nickel-metal hydride batteries, Flywheel, EDLC, SMES)

1. はじめに

我が国では、石油ショック以降、「エネルギーの合理化に関する法律」(省エネ法)に基づくエネルギー管理をはじめとした官民を挙げた様々な取り組みにより 1973 年以降、30%を超えるエネルギー消費効率の改善を実現し、世界最高水準のエネルギー消費効率を達成している。また、2005 年には、京都議定書目標達成計画の策定に伴い、省エネ法改正による対象向上・事業場の拡大、輸送事業者・荷主の規制対象化などの対策強化を行い、2006 年 4 月から改正省エネ法が施行され、運輸部門においては一定規模以上の輸送事業者及び荷主について省エネ計画の策定とエネルギー使用量の報告が義務付けられた。改正省エネ法ではクリーンエネルギー自動車の導入、環境負荷の少ない大量輸送機関へのモーダルシフトへの施策を総合的に推進することが不可欠としている。このような情勢のなか、自動車業界においては、電気自動車、燃料電池車などの開発が進む中、駆動用電源やバックアップ用電源などための電力貯蔵媒体の開発には目覚ましいものがある。

鉄道業界においては、近年、架線レストラムに代表される車両の駆動用電源として電力貯蔵装置の適用が検討されて

おり、地上側では直流電気鉄道用変電所の補完ならびに電圧降下対策、回生失効対策を目的として電力貯蔵装置が導入される段階に入ってきた。

電気エネルギーは制御性が高く、様々な用途に向き、クリーンな性質であるため、その用途は広い。しかし、電気エネルギー生産即消費という性質を有しているため、安定供給のためには、最大需要電力に対して十分な供給力を有する設備が必要である。電気鉄道は、ラッシュ時におけるピーク電力が大きい、平均負荷率(電力設備容量に対する負荷電力の割合)が低く、電力コスト増の要因となっている。また、大容量な新型車両の導入に伴い、回生エネルギーの有効利用、架線電圧補償対策の必要性が増しており、電力貯蔵装置の適用はこれらの課題解決のひとつとなり得る。

本報告では、電気鉄道における電力貯蔵技術として、地上に設置される電力貯蔵装置に焦点をあて、その変遷と最近の技術動向、保安規制について述べる。

2. 鉄道における電力貯蔵技術の変遷

〈2・1〉バッテリーポストによる負荷平準化⁽¹⁾ 電気鉄道においてバッテリーポストは、電力の負荷平準化を目的とし

て、電化の初期のころから、回転変流器、同期電動機などの主機との並列運転として設備されていた(表1)。明治末期には、信越線の碓氷峠の丸山変電所と矢ヶ崎変電所に設備され、大正初期には山の手・京浜線の川崎変電所、大井町変電所、永楽町変電所、原宿変電所に設備されていた。当時の電源系は容量が小さいため変電所の受電が不安定であり、回転変流機はたびたび故障で停電することもあった。そのため、短時間の電気車負荷は、バッテリー電源で供給され、朝夕のラッシュ時にはバッテリーと回転変流機の並列運転を行い変電所負荷率の向上が計られた。このため、設置面積も丸山変電所ではバッテリー室が430m²、変電機器室が350m²とバッテリー室の方が大きい建物となっていた。これらのバッテリーポストは15年ほど使用されたが、変電所の強化、電源事情の好転に加え、バッテリーが全てヨーロッパ製であり、その維持管理が難しいことから1927年(昭和2年)に廃止されている。

表1 電化初期の電力貯蔵装置の適用事例

Table 1. Application of Battery Posts

線名	信越線 碓氷峠		山手線・京浜線			
	丸山SS	矢ヶ崎SS	永楽町SS	原宿SS	大井町SS	川崎SS
変電所名	丸山SS	矢ヶ崎SS	永楽町SS	原宿SS	大井町SS	川崎SS
電気運転開始年月(区間)	明治45年5月～昭和3年	明治45年5月～昭和3年	明治42年12月(鳥森・新宿・上野)	明治42年12月(鳥森・新宿・上野)	大正3年12月(品川・高島町)	大正3年12月(品川・高島町)
バッテリー使用期間	明治45年～昭和3年	明治45年～昭和3年	大正3年～大正10年	大正3年～大正11年	大正3年～昭和2年	大正3年～大正14年
電圧	624V (52個直列・6並列)	624V (同左)	576V	576V	576V	1,150V
容量	1,332A (1時間放電率)	1,332A (同左)	1,000A (同左)	1,000A (同左)	1,000A (同左)	1,000A (同左)
個数	312個(430)	312個	288個	288個	288個	575個
メーカー	ドイツ アツキミュラ・トレン・ファブリク アクチエンゲゼルシャフト社製		ドイツ テュードル社製		イギリス クロライド社製	

〈2・2〉バッテリーポストによる電圧降下対策 国鉄では、1975年以降、電車負荷増に伴う既設電化線の変電所中間での電圧降下が生じる線区、地方線電化計画において適当な受電点が得られないため、送電線、変電所の建設に大きな投資を必要とする線区へのバッテリーポストの適用が考えられ基礎研究が進められた。1980年に可部線中島駅構内にバッテリーポストを設置し各種試験が実施された。このバッテリーポストは架線電圧を監視し、架線の電圧が整定値より高い時にバッテリーに充電し、低くなったら放電することにより架線電圧を補償する装置となっていた。表2に設備概要を示したように鉛蓄電池(792セル、公称1584V)で構成され、約3年間の試験によりバッテリーポストが電圧降下対策として有効である事が確認され試験が終了している。

3. 電力貯蔵装置

〈3・1〉電力貯蔵装置の種類 電力を必要に応じて蓄積・放出する装置を一般的に電力貯蔵装置と呼ぶ。現在、貯蔵媒体を中心に種々の研究開発が進められている。電力貯蔵装置は、貯蔵方式として揚水発電、圧縮空気貯蔵(CAES)、超電導電力貯蔵、フライホイール、電池、電気2重層キャパシタ等が実用化、提案されているが、電気鉄道において回生電力の吸収が可能な方式としては、表2に示す4種類が考えられる。

電力貯蔵装置を直流電気鉄道に適用しようとする場合、制御装置等の補助電源が確保できれば受電設備を必要としないため、任意の場所に設置することが可能で、電気車の回生頻度が多い場所や、回生失効が起こりやすい場所に設置することが有効である。しかしながら、現在のところ貯

表2 電力貯蔵装置の種類

Table 2. Kind of energy storage system

名称	フライホイールによる電力貯蔵	電気2重層キャパシタによる電力貯蔵	電池による電力貯蔵	超電導コイルによる電力貯蔵
構成				
貯蔵形式	運動エネルギー	物理エネルギー	化学エネルギー	磁気エネルギー
貯蔵媒体	フライホイール	電気2重層キャパシタ	電池(鉛、リチウムイオン、NAS、レドックスフロー)	超電導コイル
容量	小	小	中	大
エネルギー密度	大	中	大	小
応答時間	中	中	長	短
寿命	20年以上	10,000サイクル以上	1,500サイクル以上	30年程度

蔵媒体のコストや大きさの制限から大電力を貯蔵することが困難であるため、負荷パターンが一定の規則で繰り返される配電系統等のように負荷平準化を目的とした適用は困難である。特に、電気鉄道は間欠負荷であり、電気車の力行と回生は線区、場所、時間、天候等によって変わるため負荷パターンは一定の規則を持たず、電力貯蔵装置を用いて回生車の余剰電力を吸収し、必要なときに力行車に供給するということは原理的には可能であるが、貯蔵容量に制限がある現状ではどちらか一方の機能に制限して使用せざるを得ない可能性が高い。

現在のところ、我が国の電気鉄道においては、フライホイールによる電力貯蔵装置他数例が実用化された以外、他は試験用にとどまっている。

〈3・2〉電力貯蔵装置の構成 電力貯蔵装置の構成として 2.1 節に述べた電化初期の事例のように貯蔵媒体を直接き電線に開閉器等を介して接続する方式もあるが、最近実用化された電力貯蔵装置の多くが昇降圧チョッパを用いた充放電制御を採用している。一例として電気二重層キャパシタを貯蔵媒体とする電力貯蔵装置の主回路図を図 1 に示す。昇降圧チョッパは IGBT ユニット等を採用し、スイッチング周波数は 2kHz 程度となっている。チョッパ部は、双方向チョッパ構成としており、電力貯蔵媒体へ充電する場合は、降圧チョッパ動作を行い、電力貯蔵媒体から放電する場合は昇圧動作を行う。貯蔵装置は、架線電圧が下限設定値以下に低下したとき(電車負荷が生じたとき)に放電(電車へ電力を供給)し、電車が電気ブレーキをかけた際に架線電圧が上限設定値以上に上昇したときに回生電力を充電するように制御している。チョッパ部のスイッチング成分を除去するための LC フィルタを設置している。原則的には「回生中は充電」「力行中は放電」という単純な制御となっている。また、下限設定値、上限設定値は装置の使用目的(電圧降下対策、回生電力吸収)によって現地負荷実態に合わせて微調整の上決定される。また、先に紹介した実施例では、貯蔵媒体の過充電、過放電に対して適切な SOC (State Of Charge : 充電深度) レベルを維持す

るための制御を行なっている例もある。制御方法については検討される余地があり、今後の進展に期待する。

4. 電力貯蔵装置の適用事例⁽²⁾

電力貯蔵媒体として貯蔵エネルギー、用途、設置箇所などについて紹介した。ここでは、表 3 に示すように、すでに実用化された事例について紹介する。

表 3 電力貯蔵装置の実用化事例

Table 3. Energy storage systems for practical use

事業者	設置年	貯蔵媒体	容量 (kW)	電力量 (kWh)
京浜急行電鉄	1988	フライホイール	2,000	25
西日本旅客鉄道	2006	リチウムイオン電池	1,050	140
鹿児島市交通局	2007	リチウムイオン電池	250	18.1
神戸市交通局	2007	リチウムイオン電池	1,000	37.4
西武鉄道	2007	電気二重層キャパシタ	2,560	6.875

〈4・1〉京浜急行電鉄 昭和 40 年代に開発されたブレーキ時に運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、架線側に回生する回生ブレーキ付車両は、その省エネルギー性から現在では電気鉄道の主流の車両となっている。しかし、回生車両が発生する回生エネルギーは付近に力行する車両がないとそのエネルギーは有効に利用されず、回生失効となり機械ブレーキに切り替わり、省エネルギー性が失われることとなる。このため、回生エネルギーを大型フライホイールを使用した電力貯蔵装置に機械エネルギーとして一次蓄積し、電車力行時に電気エネルギーに変換して放出する電力貯蔵装置が検討され、京浜急行電鉄において昭和 63 年に逗子線の末端に実用機が設置され現在も稼働している。装置はフライホイール、交流発電電動機および変換器により構成される。

〈4・2〉西日本旅客鉄道 2006 年秋、西日本旅客鉄道株式会社の湖西線・北陸本線の交流電化から直流電化への切替に伴い新設された変電所では、リチウムイオン電池を用いた電力補完装置が稼働している。本装置は西日本旅客鉄道株式会社が以前導入した変電所補完装置が短時間電圧降下時に効果的に出力できる特性をベースに、回生絞込み制御と協調して回生電力を吸収し、架線電圧上昇を抑制できる双方向の機能を持った装置として導入された。この装置に使用されたリチウムイオン電池には、10CA (600A) の充放電が可能な高出力型電池が採用されている。

〈4・3〉神戸市交通局 神戸市交通局では、2005 年 5 月西神・山手線の変電所において蓄電池式回生電力吸収装置の検証試験を行なっている。当該変電所のき電区間には 29% のこう配区間が約 4 km あり、回生吸収装置が必須の区間であり、現状は西神・山手線は全ての変電所に回生インバータが設備されている。検証試験では回生インバータとの並列運転あるいは蓄電池式回生電力吸収装置の単独運転などが行なわれたが、並列運転については回生インバ

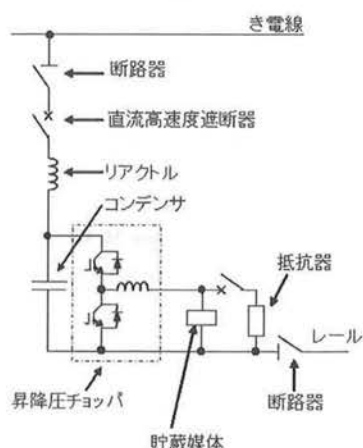


図 1 電力貯蔵装置の構成例

Fig.1. Constitution of energy storage system

ータとの協調が問題のない事、単独運転では適切な容量が選定されれば、回生インバータと比較しても十分な性能があることが確認された。

〈4・4〉鹿児島市交通局 鹿児島市交通局では輸送力の増強に伴い新型車両の導入が行なわれている。この輸送力の増大と、近年の夏場の猛暑に伴い車両の冷房装置の稼働率が高くなっており、ラッシュ時における電圧降下が生じることが懸念された。そこで回生電力を有効利用しながら架線電圧降下を補償する架線電圧補償システムを2箇所の中央分離帯上に設置した。2007年3月より営業運転を開始し順調に稼働している。本装置はリチウムイオン電池を使用し、路面電車の電停内での中央分離帯に設置可能な寸法で構成されていること、変電所から離れた場所での設置であるため、既設変電所の直流遮断器との連携のため、インターネット経由の遠隔監視および装置の運転・停止を行なう機能を有している。

〈4・5〉西武鉄道 西武鉄道では秩父線への電力回生ブレーキ車両の導入計画に伴い、2007年12月に2箇所の変電所に電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置を導入した。秩父線は単線区間で当該区間は25%以上の連続下りこう配となっている線形であり、回生車導入に伴う回生失効を防止するとともに、省エネルギー、CO₂削減を目的としている。また、電気二重層キャパシタを採用したことにより運用開始後15年間は原則メンテナンスフリーである。

5. 電力貯蔵装置の保安規制⁽³⁾

二次電池は、発電所、変電所、需要設備等に附属して設置され、主に非常用として用いられてきた設備であり、その中心は鉛蓄電池であった。この他の新型の二次電池については、同じく変電所等の附属設備ではあるものの、工事計画認可及び仕様前検査といった事前規制により国が個別に安全性を確認するため、「発電所」として位置付けてきた。しかしながら、2000年、ナトリウム硫黄電池(NAS電池)、亜鉛臭素電池及びレドックスフロー電池については、仕様実績及び技術的知見が蓄積され、国が事前規制を行わなくとも、鉛蓄電池と同等の安全性を確保できると判断されたことから、電気設備に関する技術基準を定める省令(平成9年通商産業令第五十二号、以下「電気設備の技術基準」という。)に規定されている「発電所」の定義を改正し、鉛蓄電池とともに、これから除外した。なお、二次電池以外の電力貯蔵設備であるSMES、フライホイール及び電気二重層キャパシタについては、SMESにあっては実証試験段階であり、フライホイール、電気二重層キャパシタにあっては商用ベースになって間もないことであったことから、二次電池に対する検討とは切り離し、技術動向や利用形態を見極めるべく引き続き注視していくこととした。

2007年、リチウムイオン電池、ニッケル水素電池といった新型の二次電池の利用が見られ始め、このため、二次電

池を含む電力貯蔵設備全体について、水力、火力等他の発電所との比較も踏まえつつ、工事計画の認可や使用前検査といった事前規制の在り方について見直す必要がある。このため、電力貯蔵設備の機能、構造、事故発生状況など安全性に関する状況を考慮したうえで、以下のように結論付けられた。

(1)電力貯蔵設備の電気事業法における位置づけの整理・明確化

発電所として取り扱うのではなく発電所、変電所、需要設備などを構成する一つの設備という位置づけ。

(2)電力貯蔵設備の工事計画の認可・届出などの国の事前規制の在り方

- ①電力貯蔵設備の保安は設置者が技術基準等を遵守することにより確保するという自主保安が原則であること。
- ②国の事前規制による関与は最小限とすべきであること。
- ③これまで、電力貯蔵設備の不備に起因すると考えられる重大な事故は発生していないこと。
- ④一部の二次電池においては容量の大きなものが実用化されていることを勘案すること、工事計画の届出対象は、特に規模が大きい電力貯蔵設備(1万kW×8h)とすることが適切である。

(3)電力貯蔵設備の技術基準の在り方

常用電源として用いる二次電池のリスクに対して、過電圧、家電、情報装置異常を検出して電路から自動遮断する。個別の事項として内部温度が高温のものにあっては、内部温度異常高を検出して電路から自動遮断する。

6. まとめ

以上、直流電気鉄道における電力貯蔵技術の開発状況について述べた。電気鉄道における電力貯蔵技術は、今後、太陽光発電や風量発電といった自然エネルギーを用いた電力供給技術における要素技術として発展する可能性がある。しかしながら、一方で、電気車制動時の回生電力の処理手段を車上に搭載するという試みも現実化してきており、今後、コスト、重量、体積、エネルギーの両面から総合的に検討が行われ、効率的かつ低コストなシステムが構築されるものと期待される。

文 献

- (1) 鉄道電化協会:「電気鉄道技術発達史」, p.121 (1973)
- (2) T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, M. Tsutakawa: "Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway", IEEEJ Trans 2010:5:1-8 (2010).
- (3) 総合エネルギー調査会 原子力安全・保安部会電力安全小委員会電力貯蔵設備規制ワーキンググループ