

鉄道車両駆動における蓄電装置応用

Application of the energy storage devices for railway vehicle traction system

近藤 圭一郎*

Keiichiro Kondo

Abstract

Kinetic energy of railway vehicles is much enough and it should be saved by reusing it through regenerative braking. In addition, since the load characteristics of vehicles are steep with respect to time, smoothing the load characteristics can be expected to improve the utilization rate of equipment. In non-electrified sections, fuel savings can be realized by operating the internal combustion engine (diesel engine) at a high efficiency point through hybridization with electric drive, as in the case of automobiles. High-performance batteries are indispensable for these purposes. This paper clarifies the energy characteristics of railway vehicle traction and explains the engineering rationale for the use of storage batteries. This is followed by an example of electrification using storage batteries in non-electrified section trains, an example of reuse of regenerative energy and overhead line voltage compensation using ground storage devices in electric trains, and an example of application of batteries as an emergency power source. Through these examples, this paper aims to examine how batteries are used to achieve the objectives of the railroad industry, and to help in thinking about the “good use” of batteries.

Key words : railway vehicle traction, energy storage, energy saving, peak power cut

1 序論

鉄道車両は大きな運動エネルギーを持つことから、それを回生ブレーキにより再利用することで、省エネルギー化が可能である。また、鉄道車両の負荷特性は時間に対して急峻であるため、これを平滑化することで、設備の利用率の向上が期待できる。また、非電化区間では自動車と同様に電気駆動とのハイブリッド化

により内燃機関（ディーゼルエンジン）を高効率点で運転することにより、省燃費化が実現できる。これらには高性能な蓄電池が必須である。本稿では、鉄道車両駆動時のエネルギー特性を明らかにしつつ、蓄電池を用いることの工学的な合理性を説明する。続いて非電化区間車両における蓄電池を用いた電動化の例、電気鉄道に地上蓄電装置による回生エネルギーの再利用と架線電圧補償の例、そして非常用電源としての蓄電池の応用例について解説する。これらを通じて本稿は鉄道分野における蓄電池が目的達成に対してどのように使われているかを考察するとともに、電池の「上手な使い方」を考える一助なることを目的とする。

* 早稲田大学 理工学術院

Faculty of Science and Engineering, Waseda University.

2 鉄道のエネルギーとパワー特性と蓄電装置応用

2.1 鉄道のエネルギーとパワー特性

鉄道を同じ陸上交通機関である自動車と比較することで、そのエネルギー／パワー特性を明らかにしてみたい。図1は両者を比較したものである。鉄道車両は鉄のレール・車輪で支持、案内、駆動を行うのに対して、自動車はゴムタイヤとアスファルトなどの路面でそれらを行う。鉄の車輪とレールに起因して鉄道では以下の特徴が生まれる。

- ・長編成での高速走行
- ・大型重量な車両
- ・レールに沿った走行

最後の点は電力供給を容易（線路に沿って架線を張ればよい）にしており、重く長い車両を高速で駆動するために、出力特性に優れる電気駆動が発達した。また、常に電力供給を受けられることから、エネルギー的な自立は根本的には不要である。

2.2 鉄道における蓄電装置応用

前述のように、電気鉄道車両は架線とパンタグラフによって常に電力供給が可能である。これは自動車が平面で二次元の運動を行うために、電力供給が難しいことと対照的である。したがって、電気鉄道車両は、エネルギー的に自立が必要な（電気）自動車のように、電池を始めとする蓄電装置を搭載して走行する必要はない。

しかし以下に示すような場合については、蓄電装置を用いることで、鉄道におけるパワー、エネルギー面での付加価値の向上が期待できる。

電気鉄道（地上から連続的に電力の供給を受ける鉄

道と定義され、後述の蓄電池電車は電気鉄道には分類されない）は、電力供給のための設備の新設および維持ともにコストが必要である。したがって、電気鉄道は一定の旅客需要が見込める路線にしか適用できない。輸送需要がそれほど多くない路線は非電化とし、ディーゼル車が用いられている。これに対して自動車と同様に、蓄電装置と電気駆動システムの採用により、ハイブリッド車を構成し、燃費の低減を図っている例もある。

また、電気鉄道はピーク負荷であり電力供給設備の利用率が低い。これに対し、蓄電装置を用いて、この負荷を平準化することで、設備コストの低減を図ることが期待される。また、この延長線上には、地上の変電所をバッテリーポストに置き換えて、特別高圧の受電設備を省略することに用いる考え方²も示されている。

直流電気鉄道では受電した商用交流の電力を鉄道変電所のダイオード整流器で直流に変換し、列車に供給している。そのため、列車が減速時に発生する回生エネルギーは、直流電気鉄道システムの中で有効活用する必要がある。蓄電装置を地上もしくは車上に設置し、回生エネルギーを一時的に蓄積し再利用を図る方法が用いられている。

いずれの応用形態にしても、図2に示すように、車両は運動エネルギーの蓄積要素と考えると、加減速による車両の運動エネルギーの変化分を車上・地上の蓄電装置で吸収、発散していると考えられる。これら、エネルギーのやり取りの過程で失われるエネルギーを、架線、エンジン、水素（燃料電池）などから補填している、と考えることができる。

また、鉄道において蓄電装置技術がもたらす効果と



図1 エネルギーとパワー面からみた鉄道の特徴¹

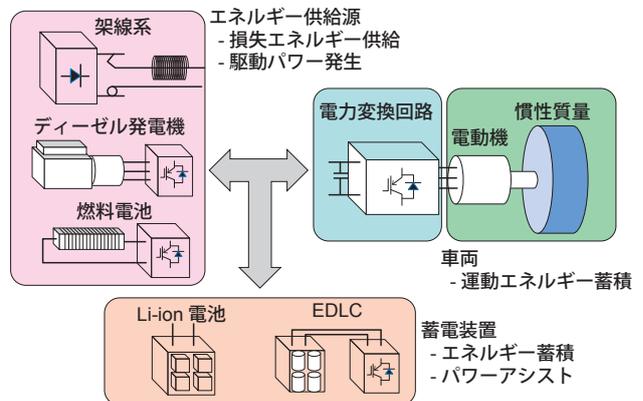


図2 鉄道における蓄電装置のエネルギーフロー¹

しては、非電化区間車両のパワーアシストと、電化区間における回生電力有効活用やピーク負荷カットに分類できる。このうち、後者については、主として地上側に蓄電装置を備える例が広まってきた。これは電気鉄道では架線で車両と地上が電氣的に接続される。そのため、重くスペースも必要な蓄電装置は地上に置く方が車上に搭載するより合理的であると言える。しかし最近では、電気鉄道車両にも蓄電装置を搭載し、非常用電源として用いる例^{3,4}も出てきた。

以上に基づき、鉄道における蓄電池応用としては、

- ・非電化区間用車両
 - ・電気鉄道における地上蓄電
 - ・電気鉄道における車上蓄電
- に分類し解説する。

3 非電化区間用車両における蓄電装置応用

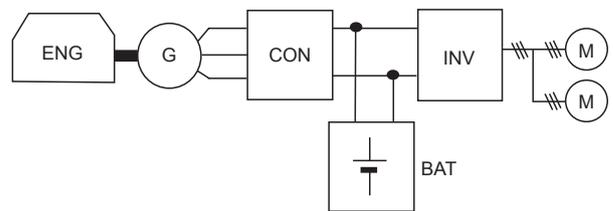
(1) ディーゼルハイブリッド車

非電化区間では、ディーゼルエンジンで駆動される気動車が広く用いられている。一般的な気動車は、エンジンの出力を液体変速機と呼ばれる、自動車のオートマチックトランスミッションと同様な機能の装置で変速して駆動する方式である。しかし、気動車の駆動系は液体変速機を始め、摩耗部品が多く、動作油の扱いなども含めて、メンテナンスに手間がかかる。そこで図3(a)のように、自動車のシリーズハイブリッドシステムに相当する方式を採用することで、変速機の解消を図るとともに、エンジンの最適効率点の多用、回生電力の吸収などによる省燃費、CO₂排出量低減などが期待されている。

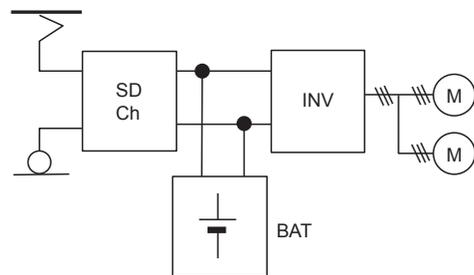
図4は2007年に営業を開始したJR東日本のキハE200形⁵である。この車両では450PSの大出力エンジンと、誘導発電機、PWM整流器とインバータで定格出力95kW（鉄道車両の駆動用電動機の定格出力は平均出力と同等であり、短時間の実力としては、その1.5倍程度の出力を発揮できる）の誘導電動機2台で40t弱の車両を駆動する。ハイブリッドシステムの蓄電池として合計15.5kWh分のリチウムイオン電池を屋根上に搭載している。回生時のピーク電力は300kW程度であることが、実に20Cでの充電を行っている。この車両は世界初の営業用のディーゼルハイブリッド車であり、キハE200形の登場以降、我が国のJR各社や海外でも用途に応じた性能のハイブリッドディーゼル車両が広まっている。

(2) 蓄電池電車

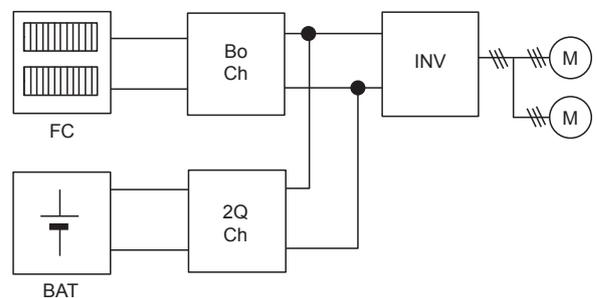
図3(b)に示すような構成の蓄電池電車も実用化されている。これが電気自動車と同様な機能、構成である。蓄電池電車ではエンジンを搭載しないため、ディーゼル車に対して騒音、排ガスの問題が解消される。図3からわかるように、このタイプの車両の主回路構成は、3つの非電化区間用蓄電装置応用車両の中で最もシンプルであるが、外部から車上の蓄電池への充電が必須である。図5に示すJR東日本のEV-E301系⁶は2両分で合計190kWh分のGSユアサ製リチウムイオン電池を搭載している。これはキハE200系の15.5kWhと比べると10倍以上のエネルギー容量である。走行中は電池のエネルギーのみで走行することに起因した容量設定である。



(a) ディーゼルハイブリッド車



(b) 蓄電池電車（非電化区間では蓄電池で走行）



(c) 燃料電池ハイブリッド電車

M：主電動機、INV：インバータ装置、CON：整流器、SDCh：降圧チョップ装置、BoCh：昇圧チョップ装置、2QCh：2象限（双方向）チョップ装置、BAT：蓄電池ユニット、ENG：ディーゼルエンジン、G：発電機、FC：燃料電池ユニット

図3 非電化区間用蓄電装置応用車両の主回路システム構成例¹



図4 JR東日本キハE200形ディーゼルハイブリッド車



図5 JR東日本EV-301形蓄電池電車

主電動機出力は95kWであり、これを2両編成で合計4台搭載している。EV-E301系は2010年に東北本線から烏山線に乗り入れる列車として営業運転を開始している。東北本線の宇都宮から宝積寺まで約10kmの電化区間で電車として走行し、同時に電池への充電も行う。宝積寺から非電化の烏山線に入り、烏山までの約20kmの区間を電池のエネルギーで自力走行し往復する。車両の質量は1両当たり約40tであるが、電池のエネルギー容量面からは一回の満充電で50kmの運転が可能である。

同様な車両は国内では他にも例があり、JR九州でも2016年から筑豊線、続いて香椎線でBEC819系蓄電池電車の運用を開始している。BEC819系に耐寒耐雪構造を付加したタイプのJR東日本のEV-E801系が2017年に登場し、男鹿線で運用されている。

(3) 燃料電池電車

図3(c)に示すような、燃料電池駆動車両が次世代の非電化区間用車両の一種として期待されている。我が国では現在、実証試験の段階である。鉄道総合技術

研究所（JR総研）およびJR東日本それぞれが試験車を製作し、各種試験を実施している。JR東日本のFV-E991系⁷は、トヨタ自動車のMIRAIに用いたものと同様な燃料電池を2両編成に240kW分搭載している。また、蓄電池としてはリチウムイオン電池を合計240kWh分搭載している。燃料電池出力は、主電動機出力（約400kW）に比して小さい。このように燃料電池電車では直接、駆動用電力を供給するよりも、蓄電池に充電することが主たる役割と言える。言わば、「充電装置付き蓄電池電車」である。燃料電池が高価であることと、その特性上負荷追従が難しいことなどから、燃料電池出力は抑え、蓄電池の出力性能で必要な負荷電力を賄う方式が合理的な設計といえる。

3 電気鉄道における蓄電装置応用

3.1 地上蓄電装置応用

地上蓄電については、リチウムイオン電池に代表される高性能な二次電池が登場する以前から、主に電圧降下対策としてフライホイール⁸などのエネルギー蓄積要素を応用する例が存在した。時代は下り、高性能な蓄電池が実用化されると、回生電力吸収と電圧救済の両方を兼ねた地上蓄電システムが広まった。

現在の地上蓄電システムは主として、

- (1) 回生エネルギー有効利用
 - (2) 架線電圧（低下）補償
 - (3) 非常用走行電源
- などに用いられている。

これらの目的毎の具体的な使用法について説明する。

(1) 回生エネルギーの有効利用

直流電気鉄道において、図6に示すように、DC/DC変換回路を介して直流き電系統に蓄電池を接続することで、回生エネルギーの有効利用を図る例がある。直流電気鉄道では商用交流を直流に変換する際にダイオード整流器が用いられるため、商用交流系統に余剰電力を戻すことはできない。そのため、回生電力が力行電力を上回る場合、回生電力の余剰分で地上の蓄電装置の充電を行い、力行電力が上回る場面で放電するというものである。地上蓄電装置のエネルギー容量は、例えばJR西日本の新疋田のバッテリーポスト⁹であれば、合計で196kWhである。電車一両分の回生エネルギーは運転速度などにもよるが、概ね2～3kWhとすると、1列車分でも十分な容量と言える。なお、電力として10C程度のCレートが確保される

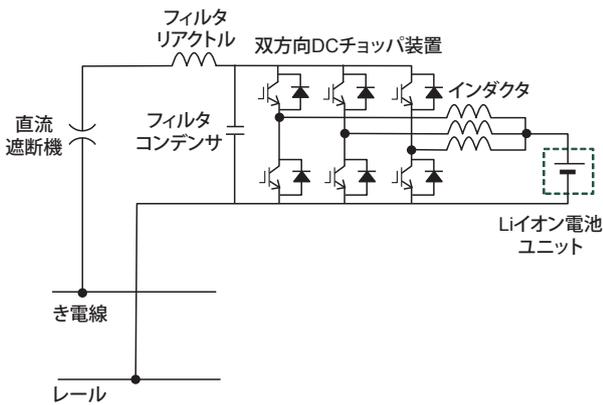


図6 地上蓄電装置の主回路構成例

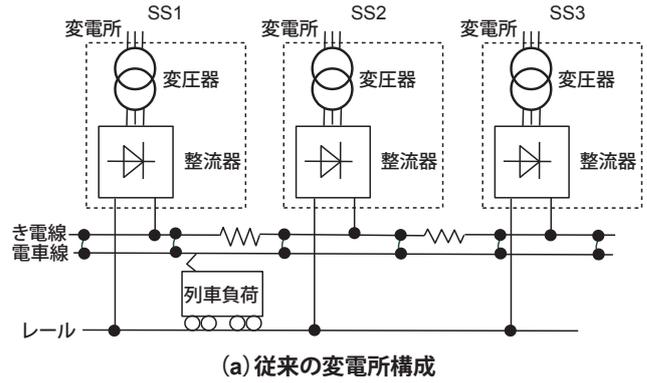
とすると2～3MW程度である。直流電気鉄道における地上蓄電装置は、回生電力吸収にとどまらず、後述の架線電圧補償や非常用電源としても活用できることから、最近ではこれらの目的も踏まえた導入例が増えている。

(2) 架線電圧補償

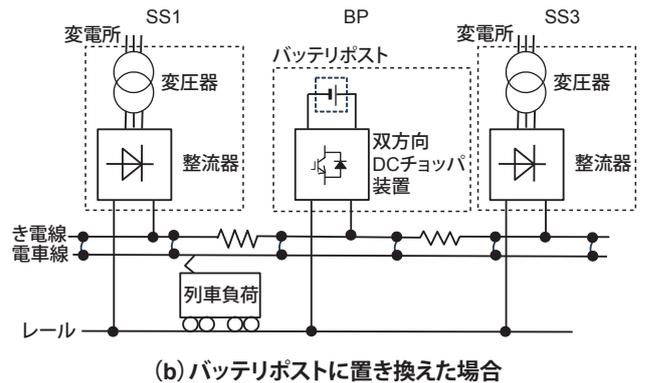
架線電圧補償と回生電力吸収は動作原理としては、表裏一体である。変電所の受電変圧器やダイオード整流回路は転流リアクタンス降下などに起因して、等価的に内部抵抗が存在する。そのため、無負荷時の送り出し電圧に比べ、定格負荷時には無負荷時に比べ例えば6～8%の電圧降下が生じる。複数列車が在線し、力行電力が大きい場合にはき電線（電車線＝架線と並行して敷設された電力供給のための線）の電圧が大きく低下する。また、力行電力そのものが少ない場合や、回生電力により変電所から供給する電力が減れば、き電線の電圧は上昇する。また、回生電力が力行電力に対して過剰になれば、車両のインバータの入力コンデンサの電圧が上がり、き電電圧は変電所の無負荷送り出し電圧以上に上昇する場合もある。蓄電装置が接続されている場合には、余剰な電力を吸収し、不足する電力はアシストすることから、上記のような電圧変動が緩和される。前述のフライホイール変電所は、路線末端で電圧変動が大きい区間の電圧変動補償に用いられている。

(3) 非常用走行電源

最近の自然災害の激甚化と、安心・安全への社会的要請の高まりから、鉄道においても、その運行のレジリエンスが強求められるようになった。これを受けて、CO₂削減や消費エネルギー低減とは別の目的として、停電時の非常用電源として蓄電池を利用するような動きもある。例えば、東京モノレールでは、約



(a) 従来の変電所構成



(b) バッテリーポストに置き換えた場合

図7 既存変電所のバッテリーポストへの置き換え

17kmの沿線の2か所（品川と多摩川）の変電所に、ニッケル水素電池を置いている⁴。通常時は回生電力吸収に用いるが、電力会社の停電時には近隣の駅まで列車を移動させ、ホームにつけることを想定している。朝ラッシュ時の最も負荷の重い時間を想定した試験を夜間にも実施もしている。また、このような事例は東京メトロの東西線などでもみられる⁵。

4 結論

以上、非電化区間車両の電動化、電気鉄道における回生エネルギー有効活用と架線電圧補償、および電化区間の非常用電源としての活用法について実例を中心に、蓄電装置利用との工学的意義について解説を行った。蓄電装置はコストやスペースの観点から、無尽蔵に活用することは難しい。したがって、目的に応じて、負荷の特性やカバーする電源の容量などを反映した、適正な性能のものを選定、利用することが肝要である。すなわち、非電化区間車両では、エンジン、地上からの充電、燃料電池などのエネルギー源の出力特性と負荷特性の差分から決まる出力性能と、その時間積分から決まる必要なエネルギー容量を決定でき

る。電気鉄道では、負荷特性と変電所が供給する電力特性から同様に決定できる。このような視点での適切な蓄電池性能や使用量を決定することが、「賢い使い方」につながると考える。

参考文献

- 1) 近藤圭一郎, “鉄道車両におけるカーボンニュートラルへの道 ～主回路技術とその周辺～連載第9回, 非電化区間車両の電動化技術(その1)” R & m誌, Vol.31, No. 6
- 2) 佐藤 滉太, 近藤 圭一郎, 小林 宏泰, 千田 誠, “地上蓄電装置による変電所代替時の蓄電容量削減を目指したき電圧補償法”, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.7, pp. 592-602, 2024.7
- 3) 白木直樹, 近藤圭一郎 “ディーゼルエンジンリチウムイオン電池ハイブリッド気動車のエンジン・電池容量設計法とその評価”, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.2, pp.178-184, 2012.2
- 4) 川崎重工業プレスリリース「東京モノレール向けに世界初となる停電時非常走行用の鉄道システム用地上蓄電設備 (BPS) を納入」
https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20140609_1.html
- 5) Tokyo Metro News Letter 大規模停電編
https://www.tokyo-metro.jp/corporate/newsletter/metroNews210311_182.pdf
- 6) Y. Kono, N. Shiraki, H. Yokoyama and R. Furuta, "Catenary and storage battery hybrid system for electric railcar series EV-E301", 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), pp. 2120-2125 (2014.5)
- 7) 岡本秀一, 久保田康介, 石川勝宏, 飯田隆幸, “水素ハイブリッド電車 FV-E991 系 (HYBARI) の開発”, JR EAST Technical Review No.69 - 2022, pp.5-10.
- 8) 島津登志成, 橘浩司 “京浜急行電鉄納め電車線用フライーホイール発電電動機” 三菱電機技報告, Vol.63, No.8, pp.60-63, 1989
<https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/1989/8908.pdf>
- 9) 東洋電機技報～製品紹介～ “西日本旅客鉄道株式会社新疋田変電所向け電力補完装置”
<https://dl.ndl.go.jp/view/prepareDownload?itemId=info%3Andljp%2Fpid%2F3049430&contentNo=1>