

バッテリー搭載型電車による 省エネルギー化

小笠 正道
車両制御技術研究部
(駆動制御 研究室長)

田口 義晃
同
(同 研究員)



おがさ まさみち たぐち よしあき

はじめに

鉄道は他の交通機関に較べて省エネで、単位距離を1人運ぶのに必要なエネルギー量(エネルギー消費原単位)は、187 [kJ/人・km]で、乗用車の2,289 [kJ/人・km]の1/10以下です¹⁾。省エネな理由の1つは、走行抵抗が小さくエネルギー損失が少ないという特長です。そしてもう一つの理由は、“ブレーキ時の電力回生”技術です。こちらは、約10年前のハイブリッド自動車の登場によって社会一般への認知度が高くなってきましたが、鉄道では自動車に先駆けて電化区間では30年以上前から広く実用化されました。国内で下り勾配の抑速回生ブレーキが最初に実用化されたのは昭和初期です。

鉄道で電力回生が早くから実用化できた要因は、電気車が架線を媒介に他の電気車とパワーを融通できたことにあります。電気エネルギーは本質的に貯めるのが難しく、発生と使用の同時化が基本です。自車の走行用エネルギーを自己搭載する必要がないので軽量化でき、架線から必要なときに所要パワーを取れることが、電気車の最大の強みです。

ただ、回生ブレーキによる電気エネルギー回収にも回生失効などの課題があります。また現状の車両とき電系は、走行する列車の運動エネルギー全てを回収・再利用できる設計にはなっていません。

他方、ここ最近の高性能バッテリーなどのエネルギー蓄積媒体の技術進歩は目覚しく、自動車業界ではEV(電気自動車)開発ブームの潮流にあります。

このような背景の中、鉄道においても回生エネルギーのさらなる有効利用策を皮切りとして、架線下を走る電車にも蓄電装置を搭載する技術開発が行われています。

ここでは、鉄道運行のさらなる省エネ化のための電力回生ブレーキの有効利用手法の1つとして、今後も大幅な進展が見込まれる蓄電技術について概説します。使用側から見た各種蓄電媒体の概要と適用事例について、バッテリー搭載型ハイブリッド電車を例として紹介します。

エネルギー回生の現状とハイブリッド化の有効性

(1) 回生ブレーキによる電力回生の原理

現在、一般的な電車のブレーキは、走行する電車の持つ運動エネルギーを電気エネルギーに換えて架線へ返す、“回生ブレーキ”が標準です。機械摩擦を伴わない非接触ブレーキのため、熱を発生させず、ブレーキシューの摩耗粉塵が出ないなど、省エネルギーかつ省保守なブレーキシステムです。

架線へ返した電気エネルギーは他の電気車が駆動するためのエネルギーとして利用されます。つまり架線に繋がった電気車の中で電気エネルギー授受を行なうことで、電気エネルギーを無駄にせず再利用しています(図1)。

(2) 回生失効と車両・き電系の設計上の課題

自車近傍に他の電氣的負荷となる電車が在線していない場合には、架線に返そうとするエネルギーが消費されず、回生ブレーキが利かなくなる“回生失効”が生じます。その場合、車両は摩擦ブレーキを用いて停止するためエネルギー回収ができず、さらには部品の消耗も生じてしまいます。

最近のインバータ電車では、架線へ返せるパワーがインバータからの回生パワーより小さくなるとパンタ点電圧が急上昇を始めるので、ある電圧値以上にならないよう、インバータから架線へ返すパワー(電流)を絞込む制御を行います。その結果、回生ブレーキ力が絞られます。全回生パワーが絞込まれた状態が回生失効です(図2)。また、そこまで至らなくても、運動エネルギーの一部しか電気エ

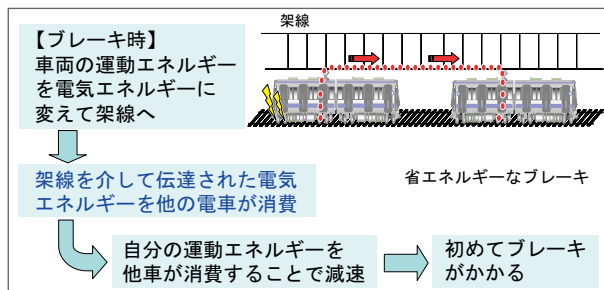


図1 架線へ電気を返すとは?

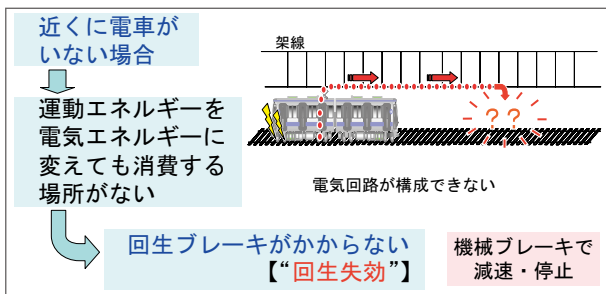


図2 回生失効とは？

エネルギーに変換できない場合があります。これを“回生絞込”と称します。電気的負荷に起因するので“軽負荷回生”とも呼ばれます。

特に直流電化区間では、変電所整流器の殆どがダイオードブリッジ型であることから電力会社が管轄する電力系統側への電力返還ができません。そのため、直流側すなわち鉄道会社サイドで電気車の回生エネルギー処理が必要となります。

近年省エネ車両としてインバータ車両の導入がさらに促進されていますが、省エネ型回生車両の割合が増加すると、線区全体としての回生量は増加します。また力行に必要なエネルギー消費量は低下していますので、回生失効確率は却って増大する傾向もあります。架線下を走る電車であってもさらなる省エネ化のためには回生負荷の確保が重要となってきているのです。

これ以外にも、架線やレールの電気抵抗によって生じる電圧降下に伴い、架線電圧の許容最大値との関連で電気車が授受できる最大パワーが制約を受けます。常用最大ブレーキのような強いブレーキを高速からかけた場合には、電気車の持つ運動エネルギーの全てを電気的に回収することは現状では不可能です。

(3) 蓄電による電源ハイブリッド化の有効性

回生ブレーキ時の軽負荷状況でパンタ点電圧が上昇し始めた場合に、並列配置した電力変換装置と蓄電装置を動作させて架線電圧上昇を抑え、架線へ返せないパワー分のみを蓄電可能なシステムが可能です(図3)。これにより、回生失効防止による回生ブレーキ信頼度向上、力行時の再利用による省エネ化とパワーアシストが可能となります。蓄電搭載量次第で、高速域回生ブレーキ力増大や蓄電エネルギーのみによる無架線区間走行も可能となります。

この場合、車両質量及び製造コスト増加を伴う点に留意する必要があります。車両質量増加は使用エネルギーを増大させますが、それに伴う走行エネルギー増分よりも、回生吸収して再利用するエネルギー量の増加分が上回れば、現状に対して運行エネルギーの削減が可能となります。

なお、車載蓄電のメリットは省エネ以外にも存在します。架線区間では、力行アシストによる時分短縮、き電抵抗による制限を超える力行・回生パワーを車両に持たせ得る、

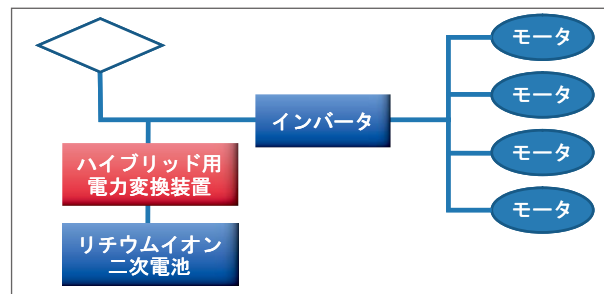


図3 架線・バッテリーハイブリッド電車の主回路構成

摩擦ブレーキの保守低減、架線停電時の自力移動による旅客閉じ込め防止が挙げられます。また、無架線区間での蓄電エネルギーによる電気駆動は、非電化区間と電化区間の直通運用による旅客利便性向上のほか、排ガスを出さない(ゼロエミッション)とか、景観重視区域での景観融和など、環境面全体においても大きなメリットがあります。

蓄電装置選定と車載適用

(1) 蓄電媒体の選定にあたって

電気車の回生ブレーキパワーの全部または一部を蓄電することは、蓄電媒体を急速充電することに相当します。鉄道車両の回生パワーを、大きさおよびその継続時間であるエネルギーを満たしながら吸収でき、かつ現実的な体積と質量で構成可能な蓄電媒体は限られます。

現実的な蓄電媒体としては、フライホイール、電気二重層キャパシタ、ニッケル水素やリチウムイオンなどの急速充電可能な蓄電池が挙げられます。各々、利点と欠点があり、万能なものは存在しません。パワーとエネルギーをどの程度のハイブリッド比にするかで決まる設計上の性能を満足させた上で、蓄電媒体に許容される質量や体積、寿命やコストの観点から選定を行う必要があります。どのような車両でこういった走行を行なうかの、車両性能設計次第ということもできます。

(2) 蓄電媒体に要求されるエネルギー量

質量40トンの電動車が速度108km/hで走行する際の運動エネルギーは、回転慣性を考慮しない単純計算で18MJ(5kWh)です。また、20トンのLRV(Light Rail Vehicle)が72km/hで走行する場合は4MJ(1.11kWh)となります。法定最高速度40km/hの路面電車が1停留所間約250mを走行するのに必要なエネルギーは、実験結果から、3MJ(0.83kWh)程度です。最高速度100km/hの2M2T編成の在来線電車が駅間2km走行するのに必要なエネルギーは120MJ(33.4kWh)にもなります。蓄電したエネルギーのみで走行する架線レスLRVを想定すると、数停留所おきの充電、信号待ちや渋滞を考慮して、システム質量1トン程度で10MJ以上のエネルギー容量を満たす媒体が必要となることが分ります。

表1 蓄電媒体の特徴と鉄道車両への車載応用状況(本線走行に至ったもののみ)

方式	フライホイール	二次電池	電気二重層キャパシタ
特長	・電動機技術が使用できる	・可動部なし	・可動部なし
	・高回転化で高エネルギー化可	・エネルギー密度大	・パワー密度大
	・電圧と電流を柔軟に設計可	・電圧変動幅小	・ゼロ電圧まで使用可
	・軸受部を除き寿命が長い	・エネルギー保存特性が高い	・二次電池よりも長寿命
開発課題	・長期耐用可能な軸受	・パワー密度増大	・エネルギー密度増大
	・損失(風損)低減	・寿命増大	・電圧変動対策
耐久性	・コリオリ力抑制支持	・セル間バランス制御	・セル間バランス制御
	・約20,000~50,000h程度(補機メンテが主要因)	・10万~30万サイクル(放電深度=10%) ・約6年(カレンダー寿命)	・10~100万サイクル⇒ 使用法・環境により5~15年
開発動向	【ドイツ鉄道】・ディーゼルハイブリッド LIREX-本線2000年~	【JR東日本】・リチウムイオンバッテリー :ディーゼルハイブリッド-本線03年04月~ :ディーゼルHB営業07年8月~(キハE200) :燃料電池ハイブリッド-本線06年~	【マンハイム交通公社】・架線ハイブリッドLRV:本線03年~
		【鉄道総研】・リチウムイオンバッテリー :架線レstrom-所内03年08月~(モ3301) :架線ハイブリッド化-所内05年02月~(モ3301) :架線レス(ハイブリッド)LRV-本線07年11月~ 08年03月(LH02 "Hi-tram(ハイ!トラム)") :燃料電池ハイブリッド-所内08年~(R291)	【JR東海】・営業08年6月~(中央線313系の1編成)
	【欧州ULEV-TAP(Ultra Low Emission Vehicle - Transport using Advanced Propulsion: 97~01年, II: 02~05年)】 ・ディーゼルハイブリッド-本線05年~	【福井大・福井鉄道・えちぜん鉄道】・リチウムイオンバッテリー :架線レstrom-本線04年12月~(モ3303) :架線レス電車-本線06年~(600型etc)	【欧州ULEV-TAP】・架線ハイブリッドLRV-本線
		【川崎重工】・ニッケル水素バッテリー :架線レスLRV-本線07年12月~(SWIMO-X) 【フランス・ニース交通局】・ニッケル水素バッテリー :架線レスLRV-営業07年11月~(LRV)	



図4 架線・バッテリーハイブリッド路面電車“りっちい・とらみい”



図5 架線・バッテリーハイブリッドLRV “Hi-tram(ハイ!トラム)”

各種ハイブリッド車両の開発例

(1) 蓄電装置の鉄道車両への搭載状況

表1に蓄電媒体の特徴と併せて、国内外の鉄道車両における開発状況を一覧比較で示します。主エネルギー源に架線、エンジン、燃料電池を、副エネルギー源に蓄電装置を用いる、エネルギー源をハイブリッド化した車両です。

なお、ここで定義するハイブリッドは、例えば、加減速に必要な所要パワーを100%としたとき、ある瞬間において主エネルギー源から60%、副エネルギー源から40%供給または回生するなど、同時協調動作できるものを指します。エンジンとバッテリーを搭載していても切替え使用しか行わないものは、ハイブリッドとは称さずデュアルモードと呼びます。

図4は2003年8月にリチウムイオン二次電池を搭載した架線レス・バッテリートラムとして鉄道総研で公開された試験電車で、2005年2月には、架線とバッテリーのハイブリッド電車として再公開されています。架線区間では回生失効防止機能による回生エネルギー量増大で省エネ走行を行い、無架線区間ではバッテリー走行によって景観重視地区の走行を行うことが可能です。図5は、上記技術を深度化して直流1500Vと直流600Vの複電圧架線にも対応可能とした、営業線走行可能な架線・バッテリーハイブリッドLRV(Light Rail Vehicle)で、2007年10月に鉄道総研で公開されました。

海外では早くからフライホイール蓄電装置を中心にハイブリッド化開発が進められてきました。2005年にはカナダでディーゼルエンジンと鉛蓄電池のハイブリッド機関車

が営業運用されています。またフランスの都市ニースでは2007年11月にLRT路線が開業、架線とニッケル水素蓄電池のデュアルモードLRVによる運行が開始されました。2009年中にはドイツの都市ミュンヘンで同様の部分架線レスLRTが運行開始される予定です。

ハイブリッド電車のパワー回路と制御、その効果

ここでは、車両に蓄電装置を搭載する方式の中から架線・バッテリーハイブリッド方式の例を概説します。

(1) バッテリー搭載型電車の主回路(基本構成)

集電装置で授受する電気エネルギーを駆動用と蓄電用(架線へ返らないときに回生蓄電)に並列接続して分配する方式です。電流可逆チョップ装置によって、架線と蓄電媒体の電圧変換および余剰パワー分の電流制御を行うことが可能です(図3)。

(2) バッテリー搭載型電車の制御

軽負荷回生状態の際に、通常のインバータ電車での絞込み動作をやめ、代わりに本来ならパンタ電圧を急上昇させる余剰パワーを並列搭載した蓄電装置に蓄えます。力行時は逆に、パンタ点電圧が降下してある電圧値に達したら、蓄電装置からのパワーを供給するのが基本です。

基本制御を核に、充放電のタイミングと量を走行線区や走行パターンに応じて制御する“エネルギー管理制御”を付加することで、最適化を図るのが一般的です。

(3) 走行試験による省エネ効果の例

鉄道総研が開発した架線・バッテリーハイブリッドLRV “Hi-tram(ハイ!トラム)”を例に実路線での走行

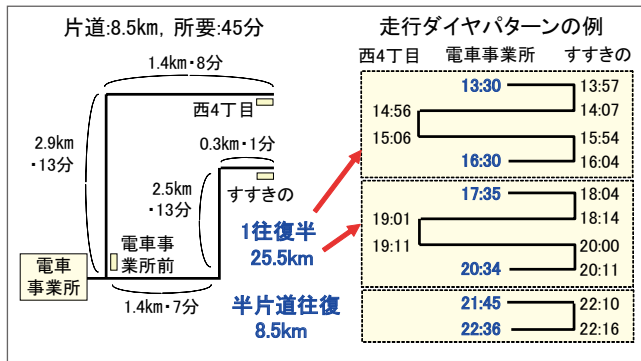


図6 札幌市交通局軌道線での営業ダイヤによる試験走行パターン例

結果²⁾を示します。この電車は蓄電媒体としてリチウムイオン二次電池（公称電圧605V、定格最大充放電電流±1200A、公称容量72kWh、システム質量2トン）を搭載しています。

2007年11月から2008年3月まで札幌市交通局の軌道営業線で、営業ダイヤで試験走行を実施しました。片道8.5kmの路線1.5往復（入庫分を併せると25.8km）を基本単位として1日当り3往復または4.5往復の試験を行いました（図6）。

①架線レス走行（バッテリー走行）

1日の平均外気温がマイナス2℃前後の日に空調暖房温度20℃設定の状態でのバッテリー走行を実施しました。1往復半25.8kmの距離を消費電力量42kWh、約3時間で走り切ることができました。駆動インバータの回生効率（回生電力量を力行電力量で除した値）は41%で、最も良いとされる山手線なみのエネルギー回収率が実現できています（図7）。

②架線ハイブリッド走行

架線ハイブリッド走行1往復の1例における消費電力量内訳を図8に示します。空調暖房20℃設定状況下での走行で、電源回生率（回生電力量を力行電力量と補機電力量の和で除したもの）が17.0%、インバータ回生効率が34.1%でした。

もしバッテリーが搭載されていなかったと仮定した場合、電源回生は架線のみとなるため、バッテリーへの回生電力量を除いて算出すると、電源回生率が2.84%、インバータ回生効率が5.69%にまで低下します。結果的として、1往復での調整充電分を除く架線からの供給電力量48kWhのうちバッテリーへの回生電力量6.8kWhすなわち14%のエネルギー削減が実現されたこととなります。バッテリー搭載による回生失効防止効果が得られています。

全体として、架線・バッテリーハイブリッドLRVの導入により10%以上のエネルギー削減効果が得られることが分かってきました。

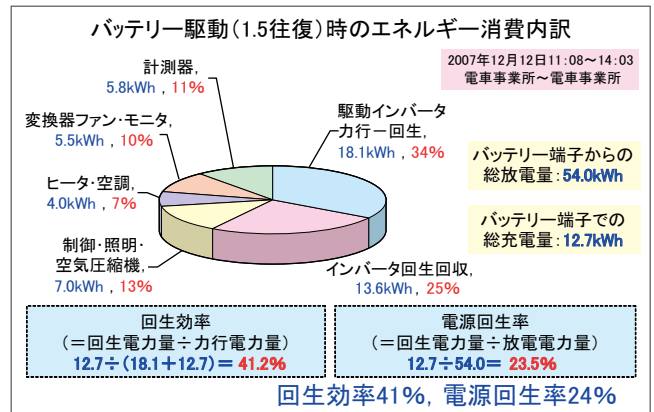


図7 電力回生の有効性

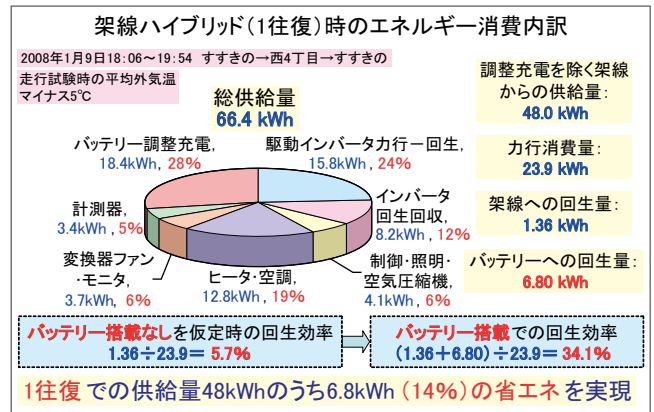


図8 バッテリー搭載による効果（回生失効防止）

おわりに

電力回生を有効活用し、一部無架線走行による都市景観融和なども可能な、車載蓄電による架線・バッテリーハイブリッド電車の技術と省エネ効果の一例について概説しました。このような技術によって省エネのみならず、新しい運行形態や保守形態が広がっていくものと考えられます。

なお、Hi-tramの開発はNEDO技術開発機構からの委託により実施しました。[RRR]

文献

- 1) 経済産業省：エネルギー白書2006年版、図第212-3-6、<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/excel/i2102036.xls>, 2006.7
- 2) 小笠・田口・大江・甘日出・末包・門脇・仲村：「架線・バッテリーハイブリッドLRV（架線レスLRV）の軌道線走行試験結果概要」、3-18, Vol.Ⅲ, pp.187～190, 2008年電気学会産業応用部門大会, 2008.8
- 3) 小笠：「鉄道における省エネルギーと環境：ハイブリッド車両を例として」、電気学会誌, Vol.127, No.4, pp.222～225, 2007.4