

電力技術に関する研究開発の動向

長谷 伸一*

Recent State of Researches on Power Supply Technology for Electric Railways

Shin-ichi HASE

The RTRI has promoted a number of researches on the technologies of power supply system for electric railways. The researches are classified into two categories; one is related to power stations and the power supply system, and another is to catenary system and other current collection systems. The final target common to the technologies classified in the two categories is how to supply stable and high-quality power. This paper presents the outline of the recent researches of the power supply system and composing equipment, and energy storage system in electrified railway system.

キーワード：電力設備，き電システム，電車線，電力貯蔵装置，電圧降下，再生電力

1. はじめに

鉄道総研における電力技術関係の研究開発体制は，電力技術研究部のき電研究室，集電管理研究室，電車線構造研究室と鉄道力学研究部の集電力学研究室の4研究室と材料関係研究室となっている。き電関係では，電鉄変電所における電力変換制御と省エネルギー，き電回路網の現象解析と最適構成，絶縁協調と絶縁劣化診断，電車線関係では，電車線設備の計測・診断，しゅう動・集電材料の劣化現象，電車線材料の開発，新しい電車線の開発，集電系の高速化，集電現象解明のための計測技術，架線・パンタグラフ系の動力的相互作用の現象解明，精密計測法および改善手法の提案などの研究開発を実施している。

本稿では，電力関係の最近の研究開発について主な研究開発成果と，最近話題の電力貯蔵装置の電気鉄道への適用の現状を述べる。

2. 主な研究開発成果

2.1 交流き電回路における高精度故障点標定装置の開発

交流き電回路においては，電車線路の地絡・短絡故障箇所の特定のために，故障点標定装置により故障点の特定を行っている。しかし，現在の故障点標定装置は標定誤差が最大1km程度あることから，故障点の探索と復旧に時間を要する事がある。そこで，標定精度の向上を目標として，故障時に保護線または負き電線に発生する

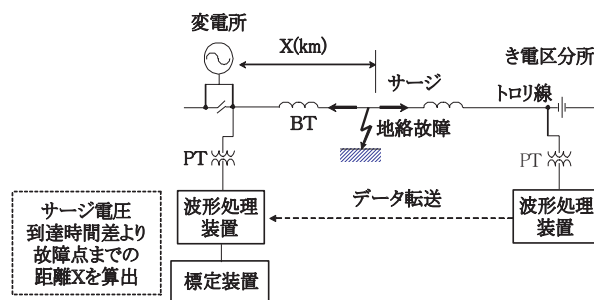


図1 サージ検知形故障点標定装置の構成

サージ電圧を利用した故障点標定装置を開発した¹⁾。本装置は図1に示すように，故障時に発生するサージ電圧を変電所，き電区分所において測定し，その到達時間差から故障点を標定する方法である。

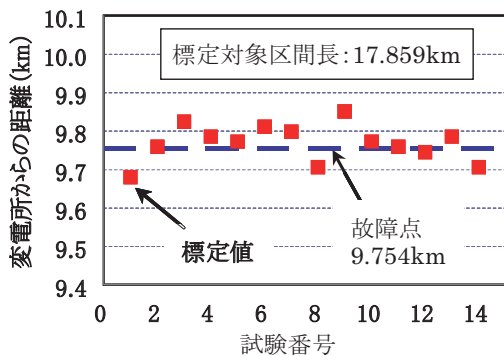
精度検証試験として，電車線路故障時に発生するサージ電圧とほぼ同等の電圧(20kVの雷インパルス電圧)を電車線路に印加し，そのときに発生するサージ電圧を変電所とき電区分所(SP)に仮設した波形処理装置により検知し，サージの到達時間差からサージ印加点(故障点に相当)を標定する試験を実施した。試験はAT区間およびBT区間において行い，その結果，図2に示すように，既設の計器用変圧器(PT)でのサージ電圧検知により，AT区間では平均標定誤差40m，標定値のばらつきは±100m程度であり，またBT区間での平均標定誤差は30mで，標定値のばらつきは±100m程度となることを確認した。この標定誤差は従来の故障点標定装置の標定誤差の1/5程度以下である。

また，変電所とSPの中間点の電車線路において，変電所のき電電源(AC20kV)を用いて人工的にトロリ線と

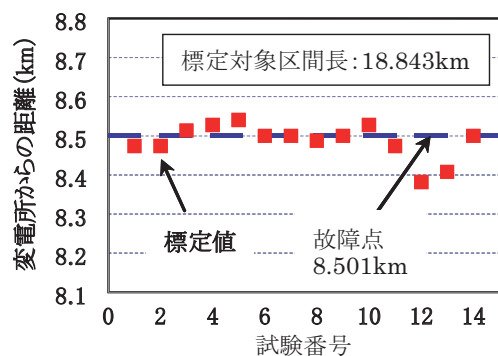
* 電力技術研究部 部長

特集：電力技術

負き電線 (NF) 間のアーク短絡故障を発生させ、そのときに発生するサージ電圧を試作した標定装置に入力し故障点を標定する試験を実施した。その結果、20kV雷インパルス試験による標定結果と同等の標定精度を得ることが出来、実故障においてもPTでのサージ電圧検知により高い精度の標定が可能であることを確認した。



(a) AT区間



(b) BT区間

図2 サージ検知形故障点標定試験結果 (20kV雷インパルス電圧による試験)

2.2 離線測定による集電性能評価の精度向上

トロリ線とパンタグラフの離線時に発生するアークは強い光を伴い、すり板やトロリ線の摩耗および騒音の原因になるため、その測定は非常に重要である。従来からこの測定には光学式離線測定装置が使用されてきた。この離線測定装置は光ファイバ先端を車上に設備し、すり板とトロリ線のアーク光を光ファイバを通して車内の測定器まで伝送する方式となっている。これまでは、検出する光の波長を限定していなかった。したがって昼間は太陽光の影響を受けて測定ができず、主に夜間に測定を実施していたが、それでもなお駅の照明等に誤反応していた。この問題を解決するためアーク光の波長を詳細に調べた結果、図3に示すようにアーク光には波長200～240nmの紫外線領域の光が、太陽光などと比較して格段に多く含まれていることがわかった。したがって、この紫外線領域の光を検出することで太陽光などの影響を受けない測定手法として、紫外線を透過する石英光ファイ

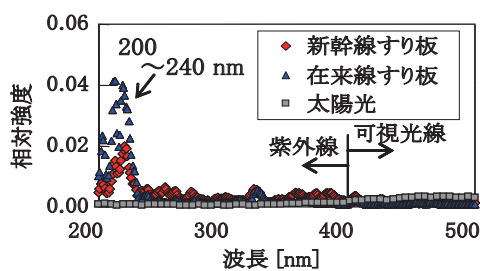


図3 アーク光スペクトラム

バを用いた離線測定装置を開発し、さまざまな測定に使用してきた。この測定装置は十分な精度を有していたが、石英光ファイバが高価であるという欠点があった。

そこで、コスト低減のために石英光ファイバに比べて1/15程度の価格で、従来から離線測定に用いられてきたプラスチック光ファイバを用いることとしたが、この光ファイバは紫外線を通さない性質があった。そこで図4図5に示すように紫外線を可視光線へ変換する装置を開発しこれを光ファイバ先端に装着した²⁾。

図6に示すように紫外線検出方式は可視光線で検出した場合とほぼ同じ測定結果が得られており、十分な精度を有することを確認した。従来の測定方式から紫外線検出方式への変更が低コストになり、離線アークの昼間測定も可能となった。この紫外線による離線測定は、各種走行試験や検測車への適用が期待され、アーク放電時の発光エネルギー、損耗量、通過電気量の関係を求め新たな集電性能評価に適用する予定である。

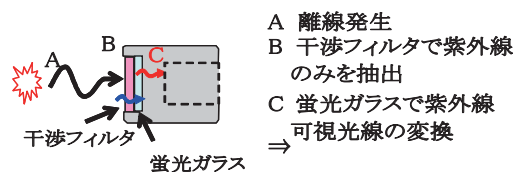


図4 紫外線・可視光変換方法

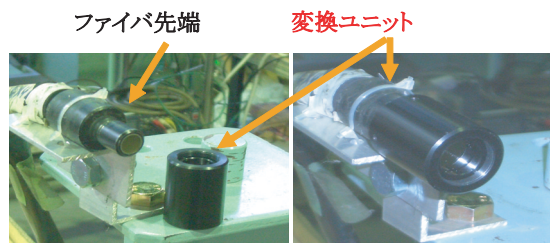


図5 変換ユニット (干渉フィルタ、蛍光ガラス) 外観

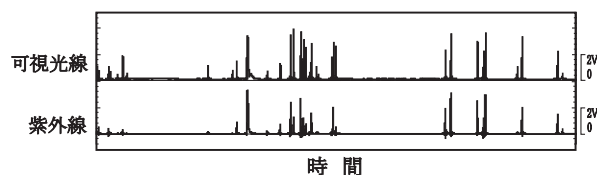


図6 アーク光の可視光線と紫外線測定結果

3. 電力貯蔵装置の電気鉄道への適用

地球温暖化防止を目的として、1997年に議決された京都議定書の発効などを契機に、省エネルギー・CO₂削減への関心が高まってきている。鉄道業界においても鉄道総研の開発した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、地上側では変電所の補完として電圧降下対策、回生失効防止対策などを目的として各種電力貯蔵媒体を用いた電力貯蔵装置の適用が実用化されてきている。本章では、地上用電力エネルギー貯蔵技術の変遷と最近の動向について述べる。

3.1 電力貯蔵技術の変遷

電気鉄道においては、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バッテリーポストが設備されていた³⁾。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、大正初期には山手・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。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っていた。このため、蓄電池容量は大きく、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昭和2年に廃止されている。

国鉄では、昭和50年代に入り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ず、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。昭和55年には鉄道技術研究所（現鉄道総合技術研究所）が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⁴⁾。このバッテリーポストは、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。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ている。

昭和63年、京浜急行電鉄は、大型フライホイールを使用した電力貯蔵装置に回生電力を機械エネルギーとして蓄積し、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を逗子線の末端に設置し、現在も稼動している⁴⁾。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。検証試験の結果、省エネルギー効果は12%と報告されている。

3.2 鉄道総研における研究開発

鉄道総研においては、平成12年～14年に電力貯蔵媒体として急速充放電が可能で長寿命の特徴を有する電気二重層キャパシタ（Electric Double-Layer Capacitors: 以下EDLCと略す）、貯蔵媒体と架線系の電力授受を行なう電力変換装置として昇降圧チョッパを用いた直流400V用の縮小モデルにより実験室レベルでの検証を行った。平成15年には、実用研究の一環として、実線区に電力貯蔵装置を設置し電圧降下補償の効果を、平成16年には回生電力吸収の効果確認を目的とした検証試験を実施した。これらの成果として、後述する西武鉄道(株)への導入がなされた。

現在、鉄道総研では、電圧効果補償と回生電力吸収の両者に対して常に有効に機能するための制御方式について研究を進めている。この制御方式は充電および放電の開始電圧を、電力貯蔵媒体の充電状況に応じて変動させることにより、電圧降下補償と回生電力吸収を両立させてき電圧の安定化に寄与しつつ、電力貯蔵媒体の待機電圧も安定化させる手法である。

この制御方式の検証として、直流750V線区にて実施した現地試験の電車負荷電流の実測データを基に効果の検証を計算にて行なった⁵⁾。充放電電圧を固定（充電電圧835V、放電電圧700V）した場合、EDLC電圧特性は充放電を繰り返すごとに徐々に最大電圧付近まで達する傾向にあった。そこで、表1に示すようにEDLCの電圧が304V～444Vの場合には、通常の充放電モードとして表に示す充電開始電圧を825Vに、放電開始電圧を650Vとした。EDLC電圧が444V～500Vの場合には積極充電モードとして充放電電圧は表に示す値に変更した。同様に、EDLC電圧が200V～304Vの場合には積極放電モードとして充放電電圧を変更する制御にてEDLC電圧を演算した。

この結果、EDLC電圧は初期電圧に関わらず時間の経過とともに、ほぼ同一となったことから、充放電開始電圧を可変にした制御が、EDLCの充電状態を判断して機能することを確認した。

表1 充放電電圧と制御モード

制御モード	EDLC電圧範囲	充電開始電圧	放電開始電圧
積極放電	500V ～ 444V	850V	750V
通常 充放電	444V ～ 304V	825V	650V
積極充電	304V ～ 200V	800V	600V

特集：電力技術

3.3 最近の実用化例

ここでは、各種電力貯蔵媒体を使用して検証試験を行っている装置、すでに実用化した装置について紹介する。

(1) リチウムイオン電池を採用した直流電気鉄道用電力補完装置⁶⁾

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新疋田変電所では、リチウムイオン電池を用いた電力補完装置が本格的に稼働している。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。

(2) 蓄電池式回生電力吸収装置⁷⁾

神戸市交通局では、2005年5月西神・山手線名谷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っている。名谷変電所のき電区間には（名谷・板宿間）は29%のこう配区間が約4kmあり、回生電力吸収装置が必須の区間であり、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。

(3) 架線電圧補償システム⁸⁾

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桜島棧橋通電停と中州通電停の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) 電気二重層キャパシタを用いた回生電力吸収装置⁹⁾

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月に吾野変電所、正丸変電所の2箇所に鉄道総研の開発した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

正丸駅から吾野駅までは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としている。

(5) 大容量ニッケル水素蓄電池を用いた電力貯蔵装置¹⁰⁾

大阪市交通局では2007年11月、谷町線駒川変電所において回生失効・電圧降下対策、事故・災害時の変電所停電補償などを目的として大容量ニッケル水素電池を用いた貯蔵装置の実車走行試験を実施している。本装置は、近年の電力貯蔵装置に使用されている充放電の制御用変換装置を用いずに、ニッケル水素電池を直流遮断器で電車線に直結することを特徴としており、そのための安全性の確認試験なども実施されている。また、変電所停電時の補償ではニッケル水素電池のみでの試験電車を走行させ停電補償の確認も行なわれている。

4. おわりに

鉄道総研の電力技術に関する研究開発状況の一部と電力貯蔵装置の最近の適用状況を紹介した。鉄道総研の研究開発にあたっては、現地試験などでJR各社はじめ多くの鉄道事業者の皆様のご協力を頂いており、本紙面を借りて深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 安喰 他：交流電車線路人工故障によるサージ検知型ロケータの標定試験，平成21年電気学会産業応用部門大会論文集，No3-33，平成21年8月
- 2) 早坂 他：光学式離線測定における紫外光検出方法とその適用結果，平成20年電気学会全国大会論文集，No5-097，平成20年3月
- 3) 電気鉄道技術発達史：鉄道電化協会，昭和58年
- 4) 交通とエネルギー：電気学会技報，597（1996）
- 5) 小西 他：電気鉄道地上用電力貯蔵装置の効果的な運用を目指した充放電制御方式の検討，平成20年電気学会産業応用部門大会
- 6) 梅田 他：リチウムイオン電池を採用した直流電気鉄道用電力補完装置，鉄道車両と技術，No126
- 7) 三崎屋 他：回生電力の有効利用方法の確立，鉄道車両と技術，No126
- 8) 星 他：鹿児島市交通局向け架線電圧補償システムの概要：鉄道車両と技術，No126
- 9) 清水 他：電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置の導入：JREA 2008，VOL51，No6
- 10) 横田 他：大容量ニッケル水素蓄電池「ギガセル」の試験について：サイバネティクス，Vol13，No2，2008