

架線レス LRV の停車中急速充電システムの開発

小笠 正道* 田口 義晃* 末包 洋士*
前橋 栄一** 兎束 哲夫*** 菅原 淳****

Development of a Quick Charge System at Tram Stops for Contact-wire-less LRV

Masamichi OGASA Yoshiaki TAGUCHI Hiroshi SUEKANE
Eiichi MAEBASHI Tetsuo UZUKA Atsushi SUGAWARA

For battery driven LRV use, there are considered several methods to charge the on-board battery quickly at tram stops or railway terminals. From the view point of the safety and the effective use of the existing infrastructure, the current collector of a pantograph type (including a single arm type one) is one of the most easily applicable methods. When adopting the above contact power collection system, we have to examine the performance of the system, in accordance with the charging current value and the energizing continuance time, especially with respect to the technical elements below: 1) Possibility of occurrence of melting and welding fusion of overhead trolley, 2) Heat rise and temperature of on-board battery, 3) Prevention method of electrical pitting of axle bearings due to leakage current from the return-circuit. In this paper, we report the experiment results of the continuance quick charge for a contact-wire and on-board battery hybrid test LRV, and the verification of the performance of the system.

キーワード：LRV，急速充電，リチウムイオン二次電池，剛体架線，溶着，軸受電食，接地装置

1. はじめに

架線・バッテリーハイブリッド電車は、架線または車載バッテリーのいずれか、あるいはその両方から駆動エネルギーを得て走行し、またブレーキ時の回生エネルギーを上記電源のいずれかまたはその両方に返還することでエネルギーの有効活用が可能な、電源ハイブリッド型電車である。従って無架線区間では、バッテリーのみのエネルギーによる架線レス走行が可能である。

架線レス走行を連続的に行なうには、車載バッテリーをいつ、どこで、どの程度の時間で充電できるかが重要になる。本研究では架線・バッテリーハイブリッド電車開発の1つの柱として、車載バッテリーによる無架線区間の連続走行を可能とするため、数km間隔の途中駅等で短時間にエネルギー補給を行なう、急速充電技術の開発を行なった。

本稿では、開発した急速充電方式とその技術、所内試験線における試験結果について報告する。

2. 架線・バッテリーハイブリッド電車と無架線走行

2.1 架線レス・バッテリー走行の意義¹⁾

バッテリー駆動による架線レス走行を行なう利点は以下のとおりである。

(1) 環境面：電気駆動のため排ガスを出さない走行が可能で、エンジン方式に比べて街中の低公害化が図られる。パンタグラフの摺動音が気になる箇所や、架線と帰線レールに流れる高調波が課題となる箇所では、集電を行わずに走行することで課題を解決できる。

また、場所により架線敷設を省略することで、都市景観の保全、改善が可能となり、観光資源価値の向上に寄与することができる。

(2) サービス面・運用面：無架線区間や、架線区間でも電圧の異なる直流電化区間や交流電化区間へは、バッテリー駆動による乗入れ走行を行なうことで、電源面での直通運用(インターオペラビリティ)が可能となる。その結果、乗換え低減による旅客利便性向上が見込まれる。

また、架線停電など非常時には、自車バッテリーの電力による自力移動による旅客閉じ込め防止に役立つ。

(3) 建設・保守面：架線設置設備費用の低減や、架線設備保守のための費用低減が見込まれる。

* 車両制御技術研究部（駆動制御）
** 鉄道力学研究部（車両力学）
*** 電力技術研究部（き電）
**** 電力技術研究部（集電管理）

特集：車両技術

また、上下寸法が狭小な場所で架線高さの問題から線路敷設ができない場合がある。このような場所でバッテリー走行を前提とすれば新たな路線建設が可能となり、公共交通ネットワークの拡充に役立つ。併用軌道の交差点では、架線設備の高さが大型自動車の走行を妨げている実例があり、自動車交通阻害防止の観点から交差点だけでも架線ははずすことは有効である。

2.2 架線レス・バッテリー走行実現の方策

バッテリーのみで走行する鉄道車両は過去にドイツや日本国内でも存在したが、鉛蓄電池式のために充電時間が長いなど運用上の制約があった。これに対し、最近の急速充電可能なバッテリーを用いることで、充電時間の大幅な短縮が望めるようになってきた。

無架線区間をバッテリー電力のみで走行するためには、バッテリー搭載量に関して2つの考え方がある。

2.2.1 バッテリー大量搭載でまとめて充電する方法

1片道以上または1日の走行分以上のバッテリー量を確保し、折り返し駅または1日の運用終了後にまとめて充電する方法である。車両に要求される最高速度、航続距離を満たすため、バッテリー搭載量は大きくなり、車両質量に占めるバッテリー質量の割合が大きくなる。

大容量のため蓄電池の充電に相応の時間を要し、走行後はバッテリーを車両から降ろして交換するか、充電時間を見込んだ運用を組む必要がある。さらに、バッテリー寿命を考慮して、通常運行に必要な量よりも多くのバッテリーを搭載する必要があり、質量は増加する。質量エネルギー密度の高いバッテリーの採用は1つの解決策であるが、現実的にはバッテリー艙装空間と導入コストの兼ね合いで採否を判断することになる。

2.2.2 バッテリーの少量搭載でこまめに充電する方法

例えば数kmごとの充電駅または充電停留場において、随時充電しながら走行（放電）できるため、バッテリー搭載量を低減することが可能となる。それでも、充電時間が運行ダイヤに大幅な制約を与えないためには、比較的大きなパワーで短時間に充電することが要求される。あるいは、充電所間隔を短くする必要がある。

なお、架線区間では架線からの給電走行時にバッテリー充電を小パワーで行なう（調整充電）ことが可能であり、部分架線レス走行は技術的にさらに容易である。

搭載バッテリー量を艙装空間とコスト面から現実的な値とするために、今回は少量のバッテリー搭載方法を選択した。

2.3 急速充電による無架線走行が可能な車両を実現するための開発項目²⁾

営業使用を見越した際に鍵となる研究開発要素のうち最重要なものは、駅停車中に大電流で急速充電するための、バッテリーと集電系に関する周辺技術であり、下記項

目(1)から(3)の全てが必要である。このうち、(2)と(3)については鉄道総研報告本号の別論文で報告するため、本稿では特に(1)に絞って述べることにする。

(1)急速充電方式：大電流急速充電のための充電部の方式（接触か、非接触式か）と具体的な構造を決定する必要がある。方式選定は既存インフラとの整合性の考慮も重要であり、接触式では場合により接触点での溶断や溶着を防ぐ構造が必要になる。また、線路上で急速充電を行うため、帰線回路に流れる大電流で車軸軸受電食を発生させない配慮が必要である。

(2)バッテリー温度上昇抑制と安全確保³⁾：大電流急速充電時にも、バッテリー寿命を縮めないよう、バッテリー温度上昇を抑制する方策が重要である。また、安全確保の観点からの過充電防止などの保護方式の開発が必要である。

有機系電解液を用いる現在のリチウムイオンバッテリーでは、高温で電解液分解が促進されて寿命縮減に至るのを防ぐ必要がある。この目的のため、具体的には吸気30℃で300A連続通電の時にバッテリー温度40℃以下、1000Aで40秒の急速充電時にバッテリー温度65℃以下となる冷却方法を開発した。

(3)急速充電対応の車載電力変換器⁴⁾：停車中の大電流急速充電機能を持つ架線・バッテリーハイブリッド電力変換器の開発が必要である。

バッテリー電圧600V、充放電電流1000Aに対応可能なように、パンタグラフ後段とバッテリー端子後段に各々容量600kWの電流可逆チョップ回路を配した主回路構成と制御法を開発した。

3. 急速充電方式の選定と接触部の部材組合せ試験

3.1 充電方式の選定

停車中の急速充電方式には接触式と非接触式が考えられるが、充電電流500A以上（直流電圧600Vのときにパワー300kWとなる値であり、空調込みで1停留場間の走行エネルギー約3.0～4.5MJを10～15秒で充電できる値）となるため、充電効率の観点から接触式とするのが現実的である。

接触式には、(a)剛体架線方式、(b)しゅう動導電板方式、(c)コネクタ方式の各方式が考えられる（図1）。しかし、(b)のしゅう動導電板方式では、旅客が容易に触れる可能性のある位置への設置となり、安全面で問題がある。また、(c)のコネクタ方式では脱着速度と高精度な停止位置の要求に難がある。安全面と既存インフラ有効活用（架線区間では架線からバッテリーを充電）の観点から、(a)の剛体架線方式を採用した。

このとき、通常の電車なら集電点が動くため問題にならない接触点の発熱が、移動の無い定点急速充電では要検討項目となる。通常トロリの場合は溶断、剛体トロリ

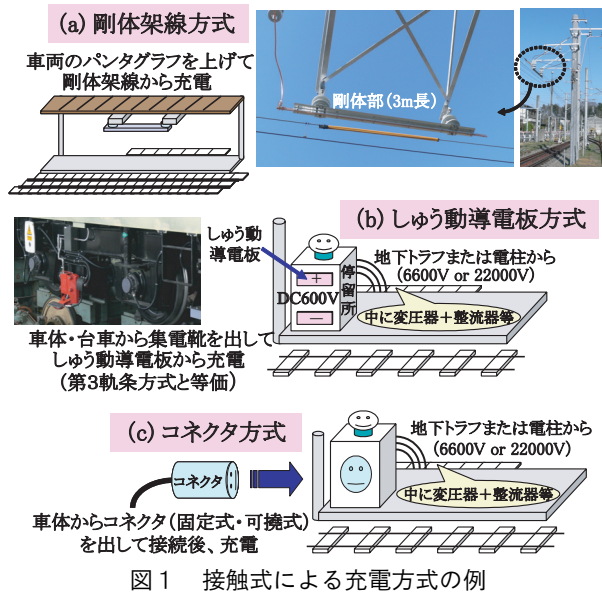


図1 接触式による充電方式の例

の場合は溶着の危険性がある。溶断を避けるため剛体架線を採用し、部材組合せによる通電試験により溶着の有無を確認することとした。

充電条件として、途中充電所を想定した充電電流1000A（直流電圧600Vのときパワー600kW）で40秒以上（計算上24MJのエネルギー）、折り返し駅での充電を想定した充電電流500Aで3分以上（計算上54MJのエネルギー）を設定した。

3.2 剛体架線トロリ部材とパンタグラフすり板部材の組合せによる通電試験⁵⁾

充電用剛体架線とパンタグラフすり板の定置試験装置を用いた大電流通電で、充電駅での集電を模擬して、剛体架線とパンタグラフ間ですり板接触部の温度上昇、電気摩耗の状況を観測した。剛体トロリには、銅（C1100BB-H）、鉄（S45C）、ステンレス（SUS304）の3種類を、すり板には、銅系焼結合金（BC）、鉄系焼結合金（TF5A）、メタライズドカーボン（PC-78A）の3種類の部材を準備し、各々の組合せ（9通り）による通電試験を行った。

試験は基礎組合せ通電試験（一定電流で所定時間の通電）と、運行形態模擬時の通電試験（LRV運行ダイヤを想定し、仮に全停留所で充電を行なうとした場合の模擬パターンによる通電）を実施した。

3.2.1 基礎組合せ通電試験

500Aで180秒と1,000Aで40秒の連続通電試験（図2）を実施した。パンタグラフは在来線電車で用いるPT48を用い、押し量は82.3N（8.4kgf）とした。実使用ではすり板が2列または4列となるが、過酷な状況を模擬するため、すり板1枚のみが剛体トロリに接触するように調整した。

試験の結果、銅同士で最高54℃、銅トロリ+カーボンすり板で最高540℃など様々な最高温度が生じた。図3に測定例を示す。



図2 剛体トロリとパンタグラフすり板の連続通電による温度上昇試験（最大電流1000A）

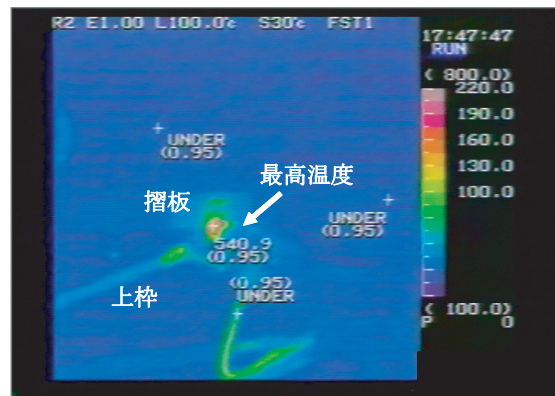


図3 パンタグラフすり板接触点の最高温度測定結果例（赤外線サーモグラフィ）

各組合せによる複数回試験での最大温度を表1に示す。接触抵抗値は、接触電圧と通電電流から算出した。

試験後、すり板に変色はあったものの剛体トロリとすり板の溶着は認められなかった。

融点は、銅1085℃、鉄1535℃、金属カーボン2500℃以上であり、全てのケースで温度に関して充分余裕があることが分かる。

剛体トロリは銅の最高温度が最も低かったが、これは銅の導電率および熱伝導率が高いため剛体トロリ全体に温度拡散が起きて冷却され易いためである。一方、鉄、ステンレスでは接触点近傍の温度上昇が顕著であった。

すり板は、銅の最高温度が低く、鉄同士の組合せを除けば、鉄、カーボンの順に最高温度が高くなった。カーボンの接触抵抗が高いことが温度上昇の要因といえる。

表1 基礎組合せ通電試験（定置）

すり板1枚（赤字最高値・青字最低値）		接触抵抗 [mΩ]	最大温度 [℃]	
トロリ	すり板		500A-180秒	1000A-40秒
Cu C1100 BB-H	C	1.5	445.4	540.9
	Cu	0.4	41.0	53.8
	Fe	1.1	232.9	386.2
Fe S45C	C	1.2	266.0	511.1
	Cu	0.8	190.9	344.4
	Fe	1.0	270.0	567.8
SUS 304	C	1.7	359.5	450.7
	Cu	1.0	328.0	397.0
	Fe	1.9	370.9	520.2

特集：車両技術

3.2.2 運行形態模擬時の通電試験

運行形態模擬時（表2）での最高温度を測定した。

表2 運行形態模擬時の通電試験（定置）

・500A×180秒（始発駅にて停車中充電） ⇒集電休止120秒（パンタグラフ降下で走行） A:⇒1000A×40秒（停留所にて急速充電） ⇒集電休止60秒（パンタグラフ降下で走行） 上記Aサイクル15回繰返し（25分） ⇒500A×180秒（終点駅にて停車中充電） ⇒集電休止120秒 [35分/1サイクル] (赤字最高値・青字最低値)			
トロリ	すり板	最高温度 [°C]	最高温度となったサイクル番号
Cu C1100 BB-H	C	345.9	1
	Cu	153.6	14
Fe	Fe	358.9	3
	C	560.8	10
Fe S45C	Cu	484.9	15
	Fe	636.8	15
SUS 304	C	473.5	1
	Cu	418.5	2
	Fe	425.0	11

サイクル継続によって熱が蓄積され、サイクル後半で温度が高くなる傾向があったが、通電後の休止時に温度が低下するため、サイクル前後半による差異よりも、材質による差異の方が大きいことが明らかになった。また、溶着は認められなかった。実使用では、剛体トロリとすり板の接触部が複数箇所となること、走行風による冷却効果が期待

できることから、温度上昇は低下する方向となる。

この結果、集電走行用パンタグラフとは別に急速充電用パンタグラフを開発搭載する必要がなくなり、LRV屋根上機器配置を現実的なものとするのが可能になった。

3.3 中古試験トラムを用いた剛体架線からの充電⁶⁾

新車LRV製作の前に、充電接触点の温度、バッテリー温度、接地抵抗値低減策の効果を確認するため、中古試験トラムを用いた総合組合せ急速充電試験を実施した。

3.3.1 試験線上への剛体トロリの建植

所内試験線の一部に停車中充電所を見立て、集電設備を建植した。剛体長さは3m、基礎通電試験で温度上昇の最も小さかった銅トロリを装備した。

剛体位置はレール中心から250mm水平方向に、既存の架線トロリからは250mm鉛直下方にずらした位置とした（図1（a））。

3.3.2 接地抵抗値低減策

通常の電車では歯車箱に接地装置が取付けられ、車軸へのブラシ押付けにより接地される。電流は車軸から車輪を通してレールに流れるが、走行中の振動等でブラシが遊離すると、電流が切れる状態となって車軸軸受に大きな電圧がかかる。この電圧が軸受油膜の絶縁破壊電圧以上になると、軸受に局部的に電流が流れ、軸受電食の原因となる。

既存の軸周接地ブラシに加えて確実な電流流路を確保するため、軸端接地装置を併用した。これは、停車中だけでなく、低速走行で剛体架線から大電流急速充電を行なう際にさらに有用となる。通電時における接触抵抗も含む接地装置ごとの抵抗値目標を10mΩ以下とした。

効果把握のため、300A対応の軸端接地ブラシを供試台車（台車と輪軸間は絶縁を施している）の各軸端に取付け（図4）、既存の軸周接地装置への帰線回路を軸端接地側に切替えることで、軸端接地装置のみによる接地抵抗値の測定ができる試験回路構成とした。

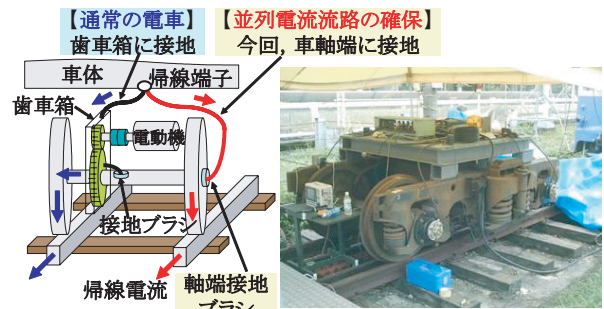


図4 軸端接地による接地抵抗値低減策

3.3.3 急速充電試験時の充電接触点の温度

中古試験トラムの受電電圧である直流750Vを架線に印加するための定置電源設備の出力の制約から、バッテリー電流最大400Aでの充電が可能であった。剛体トロリは銅で、すり板を3種類替えて充電を行なった（図5）。

図6には剛体トロリとパンタグラフすり板の接触部が最高温度となった試験例を示す。バッテリー電流400A（架線電流320A）で40秒の定電流充電後、定電圧モード

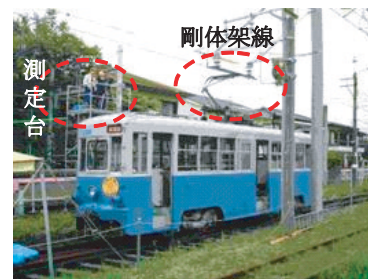


図5 総合組合せ急速充電試験

（剛体架線+パンタグラフ・バッテリー・軸端接地）

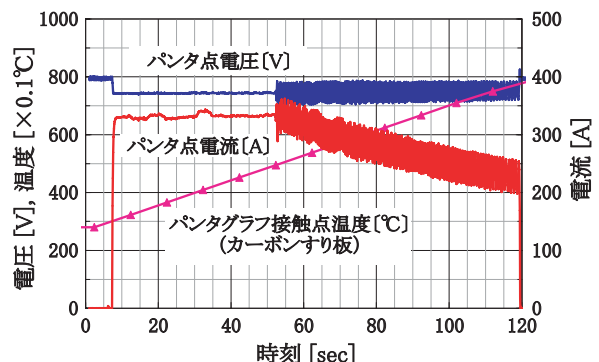


図6 総合組合せ試験時の充電接触点の温度推移

で充電を継続し110秒経過時点で充電を停止している。すり板の材質はカーボンで、最高接触温度は78℃であった。

前述の定置試験と異なり、最高温度が低く抑えられている。集電電流値が1,000Aから320Aまで低減、定電流継続時間は40秒で同じ、パンタグラフすり板が2枚となって集電電流が分流したこと、さらに屋外環境で自然冷却環境にあったことが要因である。

定置を含む一連の試験から、剛体架線トロリとパンタグラフすり板との溶着の懸念は無くなったと考えている。

3.3.4 急速充電時の軸端接地による等価接地抵抗値

図6の急速充電と同時に測定した、各車輪の軸端接地による等価接地抵抗値の推移を示したものが図7である。通電中の軸端接地装置の給電ケーブル接続端子から車輪踏面までの電圧および電流を測定して算出した抵抗の値を、等価接地抵抗値と称している。この図から、第1輪と第2輪（同一輪軸）のみ電流が流れ、第3輪と第4輪には帰線電流が流れていない。この間の等価接地抵抗値の最大値は5mΩ以下であった。

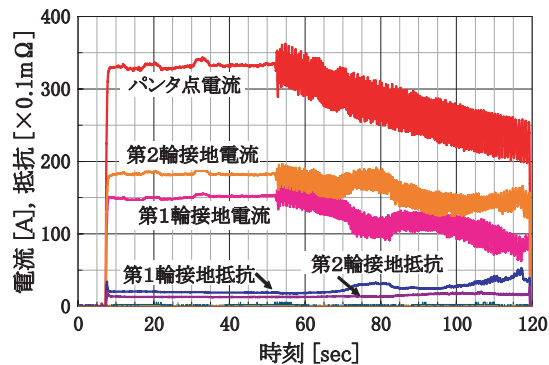


図7 総合組合せ試験時の等価接地抵抗値

図8は、各車輪の等価接地抵抗値を示したものである。同図で等価抵抗値ゼロの部分には、電流が流れなかったことを示しており表記上ゼロとなっているが、実際の等価抵抗値がゼロというわけではない。実際に電流が流れている車輪番号に対してのみ、等価抵抗値が有効である。

車両位置を変えない場合でも、測定ごとに各車輪の接地装置の帰線電流分流量は変わり、それに応じて各車輪の等価接地抵抗値が変化し、車輪ごとにばらつきを示す。

さらに、特定の車輪の軸端接地装置に流れる傾向が強く、第1輪と第2輪のみ（輪軸共通）、または第3輪と第4輪のみ（輪軸共通）のセットで通流することが多かった。試験回数のうち20%は第2輪のみが通電していた。

そこで車輪とレールの接触部を磨いたところ、比較的平均的に通流するようになった（図9）。接地ブラシそのものの抵抗値よりも、車輪とレールの接触抵抗によって帰線電流の分流が決まることが明らかとなった。

このことから、1つの台車内で4つの車輪の軸端接地ブラシに均等に分流することは望めず、帰線電流の最大値に合わせて軸端接地ブラシの電流定格を決める必要性が

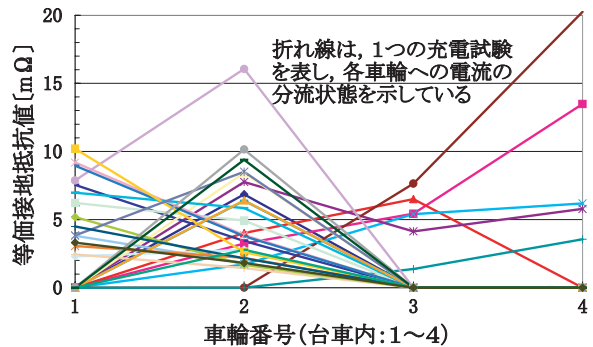


図8 各車輪の等価接地抵抗値（レール磨き前）

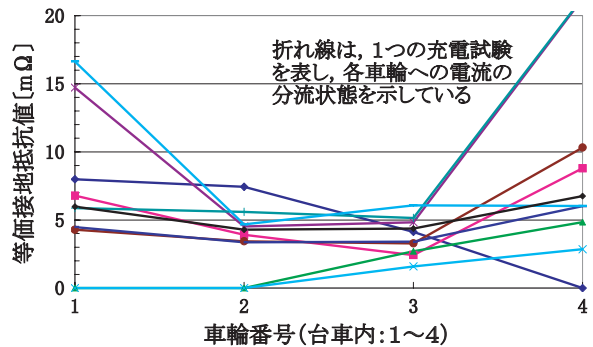


図9 各車輪の等価接地抵抗値（レール磨き後）

あることが分かった。帰線電流1000Aに対しては、600A対応以上の軸端接地ブラシの選定が必要であると判断した。そのため、新車LRVの各車輪には600A対応の軸端接地ブラシを採用した。

延べ180点測定した各軸の接地抵抗値の平均値は3.66mΩで、目標値である10mΩを超えたのは7点だけであった。目標値をほぼ達成し、車輪軸受電食による車輪回転障害等の懸念は無くなったと考えている。

4. 新車LRVによる停車中のバッテリー急速充電⁴⁾

上述の研究成果を織り込み、新車LRVを製作した。

停留所に見立てた3m長さの剛体架線下で新車LRVを停車させ、パンタグラフを介して、急速充電試験を行った（図10）。剛体架線には直流1500Vを印加した。

剛体トロリは銅、パンタグラフすり板は軌道線での営業線走行試験を行った事業者で用いられているカーボン

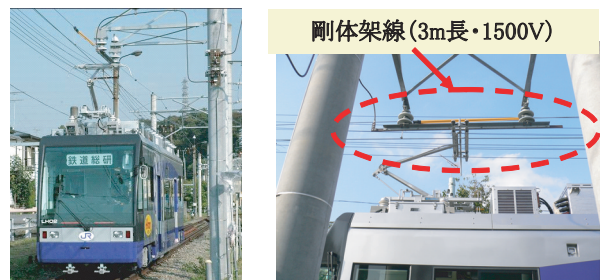


図10 試験用新車LRVを用いた1500V剛体架線からの停車中急速充電

特集：車両技術

すり板とした。

路線途中の停留所での充電を模擬したバッテリー電流1000Aで60秒以上の充電では、空調なしで距離約8km、空調最大使用を見込んで4km以上相当の走行エネルギーを充電できた(表3)。このときのパンタ点での充電電力量は42.8MJ、バッテリー端子での充電電力量は35.6MJで、急速充電時の主回路系のエネルギー効率は83.2%となった。

また、折返し駅を模擬した電流500Aで3分以上の充電では、空調なしで距離12km以上相当、空調最大使用を見込んで6km以上相当の充電が可能であった。パンタ点充電電力量は65.7MJ、バッテリー端子充電電力量は56.9MJで、急速充電時の主回路系のエネルギー効率は86.6%となった。

この結果、運行ダイヤに影響を与えない時間で必要なエネルギー量を供給できることを確認した。また、剛体トロリとパンタグラフすり板との間での溶着発生はなく、充電時のバッテリー温度上昇は3℃に抑制できた。

表3 急速充電で充填できた走行エネルギー量

バッテリー充電電流と継続時間	バッテリー端子での充電電力量	1急速充電当りの走行距離(空調なしの場合)	1急速充電当りの走行距離(空調最大負荷の場合)
1000A × 61秒	35.6MJ (バッテリー容量の13.7%)	7.9km 相当	4.0km 以上
500A × 3分16秒	56.9MJ (バッテリー容量の21.9%)	12.7km 相当	6.4km 以上

5. 結論

本論文における結論は以下のとおりである。

- (1) 500Aで3分、1000Aで40秒といったLRV走行模擬パターンによる定置集電試験を行い、剛体架線トロリとパンタグラフすり板の溶着が起らないことを確認した。特に、銅トロリと銅系すり板の組合せの場合、温度上昇を低く抑えられることが明らかになった。
- (2) 所内試験線に剛体架線を建植し、試験用路面電車を用いて架線電流320A(バッテリー電流400A)で40秒の急速充電試験を実施した。その結果、架線とパンタグラフの接触点の温度は、最も高いカーボンすり板の場合で78℃となった。銅の融点1000℃以上に対して十分な余裕があった。その結果、LRV屋根上に、急速充電用パンタグラフを別途装備しなくても、集電用パンタグラフのみで兼用できる車両設計が可能となった。

- (3) 軸端接地装置によって接地抵抗値を車輪ごとにはほぼ目標値の10mΩ以下に抑制できることを示した。車軸軸受電食の懸念は無くなったと考えられる。

また、帰線電流は車輪ごとに均等に分流しないため、接地ブラシの電流定格は最大帰線電流に合わせて考慮する必要があることが分った。新しく製作した試験用LRVには600A対応の軸端接地を装備した。

- (4) 試験用LRV新車を用いて、リチウムイオンバッテリー充電電流1000Aで60秒以上の停車中急速充電を行い、空調使用を見込んで距離4km以上の走行可能エネルギーを供給できることを実証した。運行ダイヤに影響を与えない時間で必要なエネルギーを供給できることが明らかになった。

6. おわりに

本試験には相当数の研究者、技術者に関与頂いた。関係各位にこの場を借りて謝意を表す。

再掲となるが、本研究開発は、経済産業省からの交付金を原資として実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、NEDO技術開発機構の委託契約に基づき実施した。

文献

- 1) 小笠：バッテリー駆動架線レストラム(架線・バッテリーハイブリッド)、平成18年電気学会産業応用部門大会、1-O5-2, pp.107-112, 2006.8
- 2) 小笠, 田口：架線レストラムの開発状況, RRR (Railway Research Review), Vol.63, No.11, pp.12-15, 2006.11
- 3) 田口, 小笠：大容量リチウムイオン二次電池の冷却風量設計, 平成19年電気学会全国大会5-155, pp.232-233, 2007.03
- 4) 小笠, 田口, 前橋, 門脇, 末包：架線ハイブリッド(架線レス)LRVの新車概要と車両性能, J-Rail'2007, 4-4, pp.119-122, 2007.12
- 5) 兎束, 菅原, 小笠, 毛利, 森本, 冬部：バッテリーートラムの集電に関する基礎検討, 平成18年電気学会産業応用部門大会3-14, pp.187-190, 2006.08
- 6) 小笠, 兎束, 菅原, 毛利, 前橋, 田口, 末包：バッテリーートラムの停車中急速充電システム試験結果, J-Rail'2006, 2314, p.343-346, 2006.12