

S3-1-5.

電気二重層キャパシタを適用した路面電車走行エネルギーの基礎検討

[電] ○細野俊樹, 岩本陽亮, 高原英明 (明星大学), [電][機] 山田 淳 (パワーシステム)

Studies for Light Rail Vehicles Fed by the Electric Double Layer Capacitors without Contact Wires

HOSONO Toshiki, IWAMOTO Yousuke, TAKAHARA Eimei (Meisei University)

YAMADA Jun (Power Systems Co., Ltd.)

This paper describes basic studies for the light rail vehicles without contact wire, fed by on board electric double layer capacitors (EDLC). The EDLC is going to be applied because of its large capacitance and long lifetime, and it is suitable for the every-station charge light rail vehicle system. Vehicle running simulations of 600V D.C. system for typical routes considering the vehicle mass, auxiliary power supply energy and up gradient show energy consumption of the charged EDLC system, and future possibilities are also suggested.

キーワード：電気鉄道，電気二重層キャパシタ，路面電車

keywords：electric railway, electric double layer capacitor, light rail vehicle

1. はじめに

近年，地球温暖化防止対策として，二酸化炭素などの排出ガス削減などが研究されている。

電気鉄道は効率が高い輸送機関で，都市交通では高齢化社会も考慮して，路面電車の有効活用が提起されている。また，国外では路面電車復興例が報告され，架線の無い歴史的景観に適したシステムも開発されている⁽¹⁾。

一方，電気二重層キャパシタの鉄道への適用検討も進められているが⁽²⁾，本稿では電気二重層キャパシタを適用した架線の無い路面電車の走行エネルギーの基礎検討を車両質量・補助電源消費電力・勾配条件・停車時間も考慮に

入れてシミュレーションにより行い，具体的ハードウェア算定と将来への見通しについて述べる⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 無架線路面電車の特徴と分類

<2・1> 無架線路面電車の特徴 無架線路面電車の特徴を具体的に挙げると以下ようになる。

- (1)街並みの景観を確保でき，ヨーロッパの歴史的都市において需要がある。
- (2)支柱等を含めた架線構築，維持管理作業の省略。
- (3)方式によって電力平準化で，電力供給線および給電線の電力損失が低減できる。

表 1 架線を用いない路面電車の方式分類

Table 1 Light rail vehicles without contact wires.

車両種別	駆動回路	目的および利点	問題点など
(1) 電気二重層 キャパシタ ステーション 充電方式		- EDLCの充放電に対する長寿命の利点を生かす - 充電ステーションにもEDLCを用いて消費電力を平準化 - 電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減	- 航続距離に応じて充電ステーションが必要 - ステーション毎に急速充電設備が必要 - 万一のEDLC放電による非常走行設備が必要 - 補助電源消費電力を視野に入れたエネルギーマネジメントが必要
(2) 二次電池 方式		- Lithium-ion方式など二次電池の高エネルギー密度の利点を生かして，航続距離が伸ばせる - ステーション充電設備は限定して設置できる - 電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減	- 航続距離に応じて充電ステーションが必要 - 充放電に対する二次電池の長寿命化開発が必要
(3) 燃料電池 方式		- 水素を燃料として化石エネルギーの使用低減 - 電力供給設備の省略	- 大出力燃料電池の開発が必要 - 水素供給技術と設備の確立 - 電力回生ブレーキにはEDLCなどエネルギー蓄積デバイスが必要

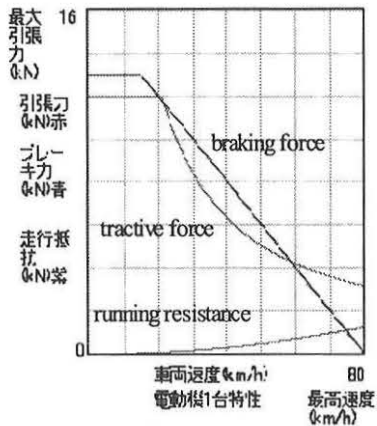


図1 電動機1台の力行・ブレーキ力特性
Fig.1. Tractive and braking force for a traction motor.

(4)集電器の磨耗が生じないため、保守点検作業が不要。

<2・2> 具体的な方式分類 表1は架線を用いない路面電車の方式を分類したものである。

(1)電気二重層キャパシタステーション充電方式

駅側には充電用の電気二重層キャパシタを置き、車両側には走行用の電気二重層キャパシタと駆動回路を搭載し、車両停車の間に電気二重層キャパシタに充電を行い、その充電エネルギーで車両を運転する方式である。

(2)二次電池方式

最近では、ハイブリッド電気自動車に用いられているリチウムイオン電池の適用が考えられ、試作車両を用いた実験も行われている⁽⁵⁾。高エネルギー密度の利点を生かして、ある程度の航続距離を確保できる。

(3)燃料電池方式

水素をエネルギー源とするもので、電気自動車用新エネルギー源として期待されているが、鉄道車両用途向けの大容量化の開発には時間がかかるといわれている。

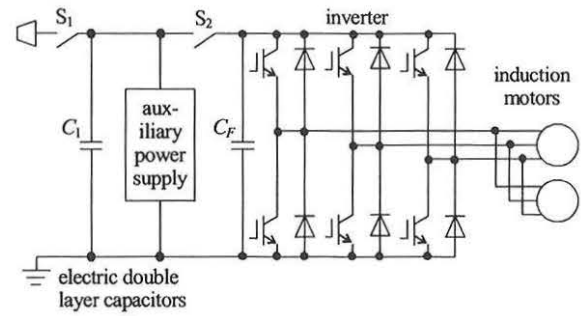


図2 駆動回路
Fig.2. Traction circuit.

3. 電気二重層キャパシタによる無架線路面電車走行シミュレーション

<3・1> 路面電車走行シミュレーション 電気二重層キャパシタを電源とする無架線路面電車を仮定し、代表的区間の走行シミュレーションでエネルギー計算を行う。これから、電気二重層キャパシタ静電容量と電圧変化の関係を求めるが、前提として国内の路面電車の諸元を調査し、これらを参考にモデル車両と路線を設定する。

<3・2> 想定車両条件 以下の条件を設定する。

- ・車両編成：電動車1両
- ・車両質量 m_w (kg): 15000, 20000, 25000
- ・電源電圧 v_s (V): 600
- ・電動機1台出力 p_m (kW): 70 ・電動機台数 n_m : 2
- ・電動機1台引張力最大値 f_m (kN): 12
- ・電動機1台ブレーキ力最大値 b_m (kN): 13
- ・加速度 α (km/h/s): 約4 ・減速度 β (km/h/s): 約4
- ・力行効率 eff_p : 0.7 ・電力回生効率 eff_b : 0.7
- ・補助電源消費電力 p_{aux} (kW): 15, 20, 25
- ・電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 (F): 10, 15, 20,

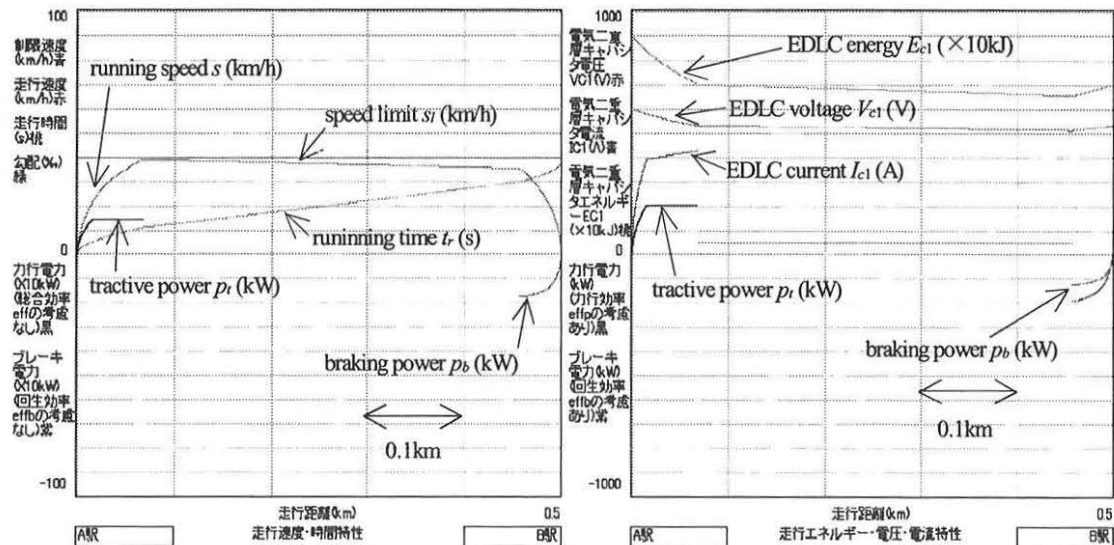
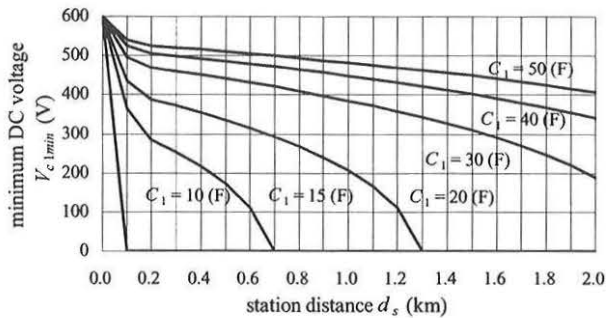


図3 2駅間走行シミュレーション ($m_w = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F), $g_r = 0$ (‰))
Fig.3. Running simulation between 2 stations. ($m_w = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F), $g_r = 0$ (‰))

表 2 駅間距離 $d_s = 2$ (km) の場合の直流最低電圧 V_{c1min} Table 2 Minimum DC voltage V_{c1min} by station distance $d_s = 2$ (km).

補助電源消費電力 p_{aux} (kW)	15						20						25					
車両質量 mw (kg)	電気二重層キャパシタ容量 C_1 (F)						電気二重層キャパシタ容量 C_1 (F)						電気二重層キャパシタ容量 C_1 (F)					
	10	15	20	30	40	50	10	15	20	30	40	50	10	15	20	30	40	50
15000	0	0	164	371	440	476	0	0	164	371	440	476	0	0	0	218	354	415
20000	0	0	0	346	424	465	0	0	0	279	385	437	0	0	0	190	342	407
25000	0	0	0	310	403	449	0	0	0	237	363	422	0	0	0	126	319	391

図 4 駅間走行距離 d_s と直流最低電圧 V_{c1min}
($mw = 20000$ (kg), $g_r = 0$ (%), $p_{aux} = 25$ (kW))Fig.4. Minimum DC voltage V_{c1min} to station distance d_s .
($mw = 20000$ (kg), $g_r = 0$ (%), $p_{aux} = 25$ (kW))

30, 40, 50

図 1 は車両速度 s (km/h) に対する電動機 1 台の力行・ブレーキ力特性および走行抵抗を表す。また、力行効率 eff_p は直流電源から車輪踏面出力まで、電力回生効率 eff_b は同様に車輪踏面ブレーキ力から直流電源までの総合効率を表す。また、図 2 は 2 台の誘導電動機を駆動する路面電車の想定回路である。

<3・3> 想定路線条件 複数の代表的路面電車路線を調査し、次に示す想定路線を設定する。

・駅間距離 d_s (km) : 0.1~2.0 (各 2 駅間, 0.1km 毎に設定)

・勾配 g_r (%): 0~20

・制限速度 s_l (km/h) : 40

以上の設定条件で、電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 と駅間距離 d_s を変化させ走行シミュレーションを行う。

<3・4> シミュレーション結果 第 1 ステップとして次の車両質量 mw および補助電源消費電力 p_{aux} と電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 の組み合わせで、駅間距離 d_s を 0.1km 毎に変化させて走行シミュレーションを行う。

$mw = 15000$ (kg), $p_{aux} = 15, 20, 25$ (kW)

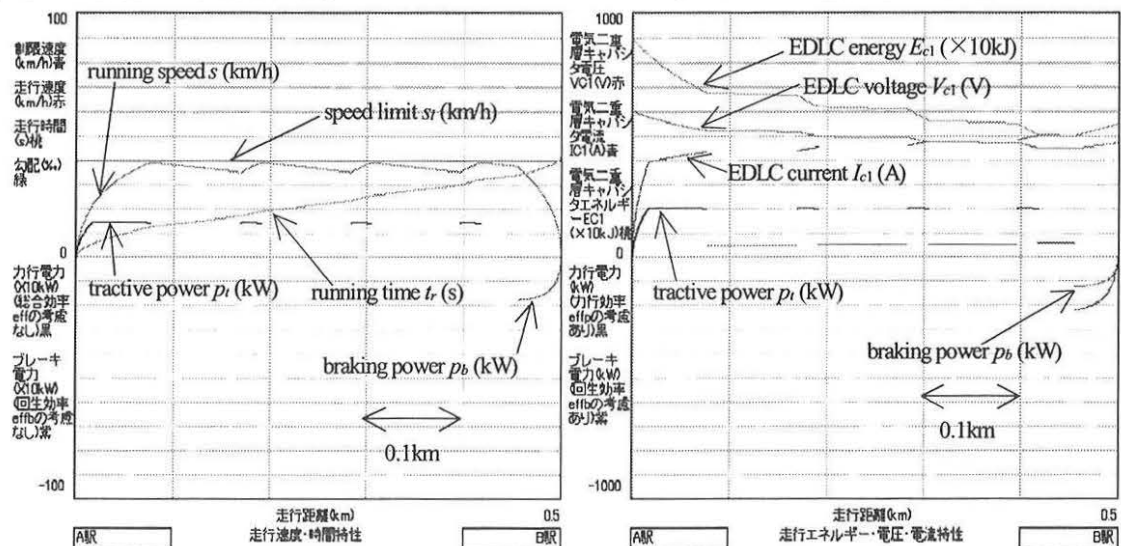
$mw = 20000$ (kg), $p_{aux} = 15, 20, 25$ (kW)

$mw = 25000$ (kg), $p_{aux} = 15, 20, 25$ (kW)

$C_1 = 10, 15, 20, 30, 40, 50$ (F)

例として図 3 は車両質量 $mw = 20000$ (kg), 補助電源消費電力 $p_{aux} = 25$ (kW), 2 駅間距離 $d_s = 0.5$ (km), 勾配 $g_r = 0$ (%), 電気二重層キャパシタ静電容量 $C_1 = 50$ (F) の走行シミュレーション結果を示す。図の左側は走行距離 d_s に対する走行速度 s (km/h) などを、また右側は電気二重層キャパシタ電圧 V_{c1} (V), 電流 I_{c1} (A) などを表す。図 4 は $mw = 20000$ (kg), $g_r = 0$ (%), $p_{aux} = 25$ (kW) に設定した 2 駅間毎の直流最低電圧 V_{c1min} の計算結果を示す。表 2 は駅間距離 $d_s = 2$ (km) の場合の直流最低電圧をまとめたもので、車両質量 20000 kg, 補助電源消費電力 25 kW では電気二重層キャパシタ静電容量 50 F で直流電圧が 400 V 以上となる。

また、図 5 は勾配条件を加味したシミュレーション結果

図 5 2 駅間走行シミュレーション ($mw = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F), $g_r = 10$ (%))Fig.5. Running simulation between 2 stations. ($mw = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F), $g_r = 10$ (%))

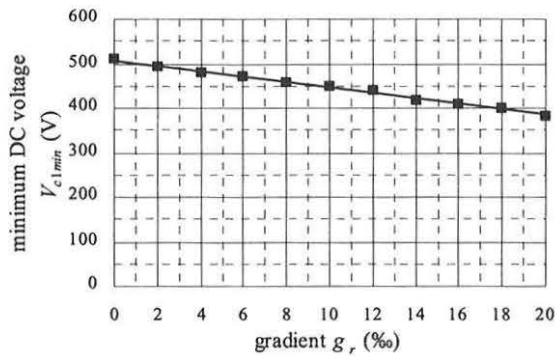


図6 上り勾配と直流電圧最低値 ($mw = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F))

Fig.6. Minimum DC voltage to up gradient. ($mw = 20000$ (kg), $p_{aux} = 25$ (kW), $d_s = 0.5$ (km), $C_1 = 50$ (F))

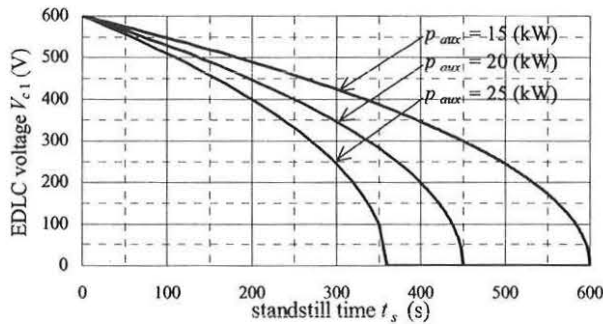


図7 停車時間と電気二重層キャパシタ電圧 ($C_1 = 50$ (F), $V_{c1} = 600$ (V))

Fig.7. EDLC voltage to standstill time. ($C_1 = 50$ (F), $V_{c1} = 600$ (V))

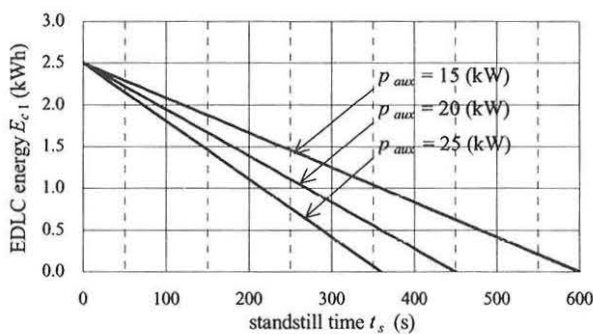


図8 停車時間と電気二重層キャパシタエネルギー ($C_1 = 50$ (F), $V_{c1} = 600$ (V))

Fig.8. EDLC energy to standstill time. ($C_1 = 50$ (F), $V_{c1} = 600$ (V))

例で、勾配 $g_r = 10$ (‰)、駅間距離 $d_s = 0.5$ (km)として最高速度から 5 km/h 低下で再力行した場合である。なお、車両質量 $mw = 20000$ (kg)、補助電源消費電力 $p_{aux} = 25$ (kW)、電気二重層キャパシタ静電容量 $C_1 = 50$ (F)と設定した。図6は

勾配を変化させて同様に行った計算結果から直流電圧最低値をまとめたもので、0.5 km の走行距離では 18 ‰ の上り勾配で直流電圧は約 400 V まで低下する。

図7, 8 は停車時間を考慮した 600 V, 50 F の電気二重層キャパシタ電圧とエネルギーの低下を示す。補助電源消費電力が 15~25 kW の場合、6~10 分で完全放電するため、持続可能時間は 3~5 分程度である。

図9 は 600 V 電気二重層キャパシタ静電容量に対する質量の変化を示したもので、現状のエネルギー密度 6.5 Wh/kg の場合、50 F で 380 kg となるが、今後の非多孔性炭素材料の適用で小形・軽量化が進むと考えられる。

4. まとめ

架線を用いない路面電車への電気二重層キャパシタ適用を前提に、走行エネルギーシミュレーションを行った。駅間距離を変化させ、補助電源消費電力を考慮した結果、直流電圧 600 V、静電容量 50 F の電気二重層キャパシタで 2 km 程度は走行できる。また、勾配条件や停車時間を含めても、0.5 km の走行が可能である。今後の開発によるエネルギー密度向上で、ハードウェアの小形・軽量化が進むことが期待される。

文 献

- (1) Steiner, M., Scholten, J.: "Energy Storage on board of DC fed railway vehicles", 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, June 2004
- (2) 小西・長谷・中道・奈良・上村・関澤・山本: 「電気二重層キャパシタの鉄道地上設備への応用」電気学会交通・電気鉄道研究会TER-04-48
- (3) 細野・高原・山田: 「電気二重層キャパシタを適用した無架線路面電車の基礎検討」平成16電気学会産総大3-21
- (4) 細野・高原・山田: 「電気二重層キャパシタの充電エネルギーによる架線を用いない路面電車走行の基礎検討」電気学会交通・電気鉄道研究会TER-04-50
- (5) 鮫島・小笠・山本: 「リチウムイオン二次電池を搭載したバッテリートラム車両」平成15電気学会産総大3-34

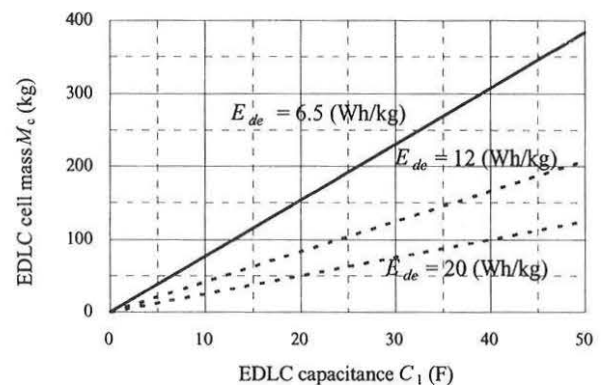


図9 電気二重層キャパシタセル質量 ($V_{c1} = 600$ (V))
Fig.9. EDLC cell mass. ($V_{c1} = 600$ (V))