

S1-2-3

架線のない路面電車の電気二重層キャパシタ

ステーション充電エネルギーについて

[電] ○ 藺 田 賢 [電] 高 原 英 明(明星大学) [電] 山 田 淳(パワーシステム)

Charge Station Energy of the Electric Double Layer Capacitors for Light Rail Vehicles without Contact Wire

Satoshi Sonoda Student member, Eimei Takahara Member (Meisei University), Jun Yamada Member (Power Systems Co., Ltd.)

This paper describes studies of the light rail vehicles without contact wire. The Electric Double Layer Capacitors (EDLC's) are applied both to charge stations and to traction circuits. As the EDLC's are advantageous with their long lifetime through frequent charge and discharge, they are regarded as suitable for the station charge vehicle system. Vehicle running simulations for 600V D.C. with typical vehicle conditions show energy consumption of the EDLC charging system. The EDLC's at charge stations effectively suppress the peak value of the supply power from sub stations, especially when the stopping and charging times are suitable. It also increases the total efficiency by reducing the internal losses of the power supply systems.

キーワード：電気鉄道，電気二重層キャパシタ，路面電車

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

1. まえがき

近年，地球温暖化防止のための温室効果ガス排出削減と，化石エネルギーの効率的利用が大きな課題となっている。

電気鉄道は自動車と比べて，エネルギー効率がよく，また電力回生ブレーキによるエネルギーリサイクルが一般的に行われている。また，都市内交通においては高齢化社会も考慮して路面電車の有効活用が検討されている。国外では復権例も多数報告されていて，景観に考慮した架線がないシステムや，架線が途切れるシステムの開発も試みられている⁽¹⁾。

エネルギー貯蔵装置の分野では，長寿命で急速充放電が可能な電気二重層キャパシタが注目され，鉄道への適用の研究が進められている。

本論文では車両と充電ステーションに電気二重層キャパシタを適用した架線のない路面電車を想定し，コンピュータシミュレーションを行う。それにより，充電ステーションと変電所に必要な電力容量の検討を行う⁽²⁾⁽³⁾。

2. 架線を用いない路面電車

街並みの景観を保護する動きが強いヨーロッパでは，これに適した架線のない路面電車システムが開発されている。架線のない路面電車には次のような利点がある。

- (1) 街並みの景観を保護できる。
- (2) 架線の建設作業や維持管理作業が不要になる。
- (3) 電力平準化で電力供給線と架線の損失が低減できる。

また，電源に電気二重層キャパシタを適用し，インバータによる交流電動機駆動方式とすると，次のような利点がある。

- (1) 電気二重層キャパシタの頻繁な充放電に対して寿命が長い利点を生かすことができる。
- (2) 電力回生ブレーキによる使用エネルギー節減ができる。
- (3) 充電ステーションにも電気二重層キャパシタを設置し，車両へは急速充電，変電所からは常時小電流で充電することで消費電力の平準化ができる。

3. 電気二重層キャパシタによる架線のない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

車両と充電ステーションに電気二重層キャパシタを適用した架線のない路面電車を想定し，一定区間を走行した際の電気二重層キャパシタのエネルギーと電圧などを計算する。前提条件は国内の架線のある路面電車方式を参考に設定する。

3.2 想定車両条件

国内の一般的路面電車車両を参考に以下の条件を設定する。なお，車両質量，補助電源消費電力，電気二重層キャパシタ静電容量は従来からの検討結果⁽²⁾⁽³⁾に基づき設定する。

- ・車両編成：電動車1両
- ・車両質量 m_w (kg)：20000
- ・電源電圧 v_s (V)：600
- ・電動機出力 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)：4.3
- ・減速度 β (km/h/s)：4.7

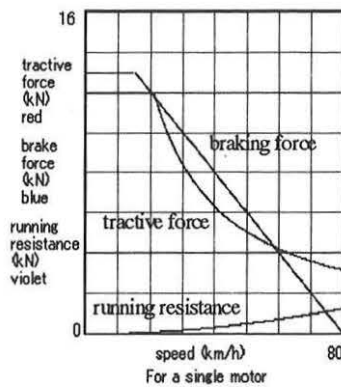


図1 電動機1台の力行ブレーキ力特性

- ・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
- ・車両内電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 (F): 50

車両駆動回路はインバータにより2台の誘導電動機を駆動する一般的な回路とする。図1に電動機の力行・ブレーキ力特性と走行抵抗を示す。

3.3 想定路線条件

車両条件と同様に国内の路面電車路線を調査し、次の条件を設定する。

- ・駅間距離 d_s (km): 0.5
- ・駅停車時間 t_s (s): 5~30
- ・制限速度 s_l (km/h): 40

3.4 充電ステーション条件

図2にシミュレーションで想定した充電ステーション系統を示す。4箇所の充電ステーションに同一の変電所から並列に電力供給を行う系統で、それぞれの充電ステーションには車両と同様に電気二重層キャパシタを設置する。充電ステーションに設置する電気二重層キャパシタは車両条件、路線条件と走行エネルギーより以下の値に設定する。

- ・ステーション電気二重層キャパシタ静電容量 C_{st} (F): 20
- ・ステーション電気二重層キャパシタ定格電圧 v_{est} (V): 900

充電ステーションは車両が駅に停車中に電力制限機能付き電力変換器を介して車両を急速充電する。同様に充電ステーションの電気二重層キャパシタは車両を充電していない間に、変電所から電力変換器により電力を制限して充電を行う。なお、車両の充電は駅停車時間内に大電力で急速に行うが、充

電ステーションの充電は車両充電時以外、常に行えるので充電ステーション電気二重層キャパシタの放電電力より充電電力を小さく設定し、変電所の電力を平準化することができる。

電力制限は、車両の充電では5~30sの駅停車時間で車両内電気二重層キャパシタの電圧を600Vまで充電する値とし、同様に充電ステーションの充電では車両が充電ステーションで充電中でない間に充電ステーション電気二重層キャパシタ電圧を900Vまで回復する値として求める。

3.5 走行シミュレーション結果 (車両)

図3は駅停車時間10sの場合の車両走行に関するシミュレーション結果である。横軸を走行時間として、車両速度 s_r 、走行距離 d_s などの走行特性やその時の電気二重層キャパシタ電圧 v_{cl} 、電気二重層キャパシタエネルギー E_{cl} 、力行電力 p_p 、ブレーキ電力 p_b 、電気二重層キャパシタ電流 i_{cl} を示している。

2駅間では車両は制限速度40km/hまで加速後、約20s間惰行し電気ブレーキで次駅に停車している。この時の電気二重層キャパシタ電圧 v_{cl} は力行と補助電源消費電力により、初期電圧600Vから510Vまで低下するが、その後の電気ブレーキで充電ステーション停車時には540Vまで回復する。そして発車までの10s間、183kWで急速充電され、発車時には600Vになる。同様に電気二重層キャパシタエネルギー E_{cl} は初期値9MJから力行と惰行で7MJまで低下し、電気ブレーキで7.4MJまで上昇して、充電ステーションで初期のエネルギー値に回復する。次区間以降もこれら一連の動作を繰り返し、4駅間走行後の電圧、エネルギーは初期値と同じになる。

3.6 走行シミュレーション結果 (充電ステーション)

図4は図3と同一条件での充電ステーションに関するシミュレーション結果で、上段は充電ステーション電気二重層キャパシタの放電電力 p_{est} と充放電電流 i_{est} を表し、下段は車両内電気二重層キャパシタへの充電電力 p_{chv} 、電流 i_{chv} および変電所からの供給電力 p_{ss} 、供給電流 i_{ss} を表す。共に変電所からの供給を正側、車両への供給を負側として示している。上段の図の充電ステーション電気二重層キャパシタ電圧 v_{est} は10s間183kWで車両を充電することにより、初期値900Vから800V程度まで低下するが、その後、変電所から38.2kWに制限された充電電力で徐々に充電され、次車両が到着するまでに900Vまで回復する。この時の車両への放電電流最大値は160A、変電所からの充電電流最大値は40Aである。

下段の図の車両充電中は、充電ステーションから車両へ183kWで充電が行われているが、同時に変電所から38.2kW

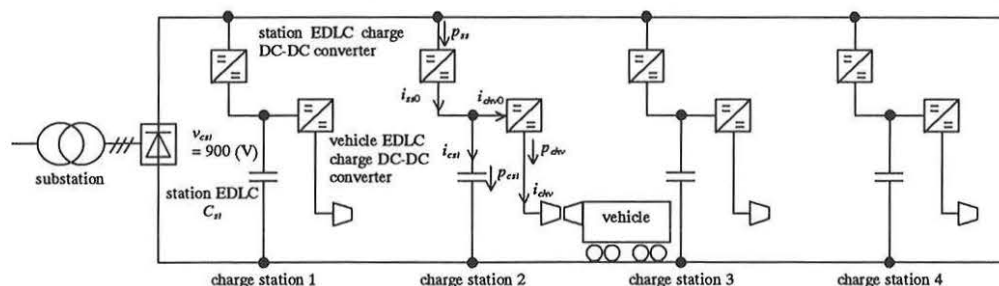


図2 充電ステーション系統

が供給されている。すなわち充電ステーション電気二重層キャパシタは両者の差分の 144.8 kW の電力を分担している。車両の充電終了後は変電所から 38.2 kW の電力で充電ステーション電気二重層キャパシタが徐々に充電される。このため、変電所および充電ステーション電気二重層キャパシタの負担する最大電力は緩和され、変電所の供給電力が平準化される。

3.7 シミュレーション結果のまとめ

表 1 は変電所からの供給電力、充電ステーション電気二重層キャパシタの充放電電力、車両内電気二重層キャパシタへの充電電力などを停車時間毎にまとめたものである。停車時間 10 s に着目すると、変電所からの供給電力 p_{ss} は最大値 38.2 kW に対して実効値は 31.8 kW、車両内電気二重層キャパシタ

への充電電力 p_{chv} は最大値 183 kW に対して実効値は 80.7 kW である。この時、充電ステーション電気二重層キャパシタは実効値 69.3 kW の充放電電力を負担しており、その時の充放電電流実効値は 80.7 A である。これらは現状の電気二重層キャパシタのパワー密度の点から問題ない値と考えられる。

また、表 1 の太枠は電力変換器による制限電力を表し、駅停車時間が 5 s の場合の制限電力は充電ステーションが 349.0 kW、変電所が 40.8 kW となり、30 s の場合は充電ステーションが 70.0 kW、変電所が 30.9 kW となる。図 5 は駅停車時間に対する制限電力を表す。駅停車時間が 5 s の場合の充電ステーションの制限電力は 10 s の時の 2 倍近いのに対して、変電所の制限電力は 10 s の場合とほとんど変化が見られない。

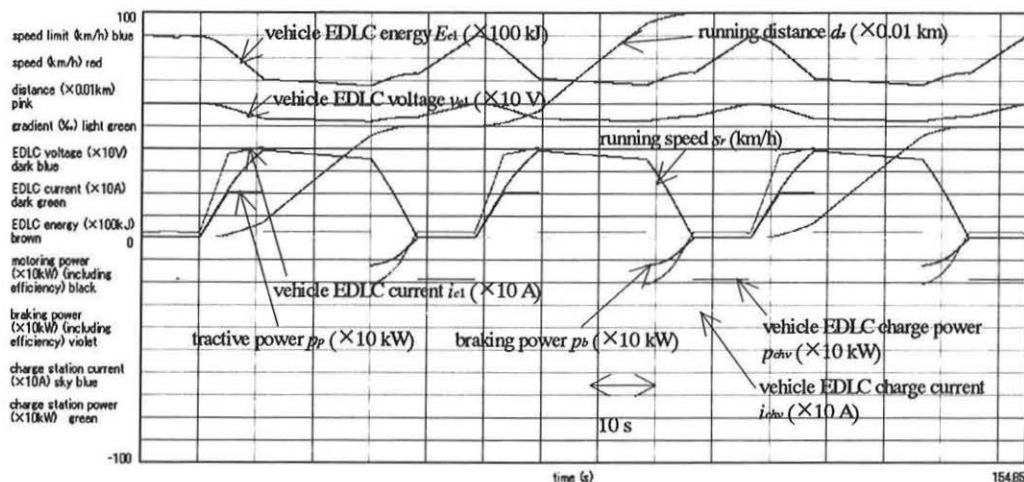


図 3 4 駅間走行シミュレーション

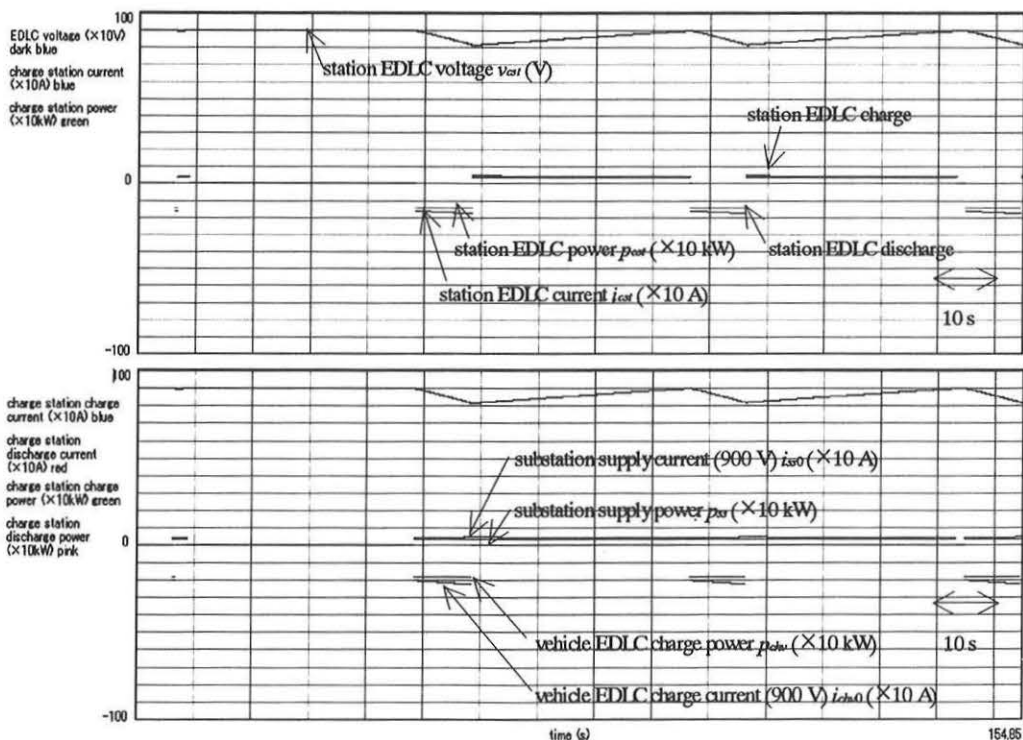


図 4 4 駅間走行シミュレーションによる充電ステーション電圧・電流・電力

表 1 変電所および充電ステーション電力、電流

駅停車時間 t_s (s)		5	10	15	20	25	30
変電所からの供給電力 p_{ss} (kW)	最大値 (制限値)	40.8	38.2	35.2	34.6	32.1	30.9
	実効値	33.5	31.8	30.0	29.4	27.9	27.0
変電所からの供給電流実効値 i_{ss0} (A)		39.2	37.0	34.8	34.0	32.2	31.1
充電ステーション電気二重層キャパシタ電力実効値 p_{est} (kW)	充電	30.6	27.0	23.9	22.2	20.0	18.4
	放電	102.6	63.8	46.3	37.0	29.7	25.0
	充放電	107.1	69.3	52.1	43.1	35.8	31.0
		35.9	31.5	27.7	25.7	23.0	21.2
充電ステーション電気二重層キャパシタ電流実効値 i_{est} (A)	充電	120.0	74.3	53.7	42.8	34.2	28.8
	放電	125.2	80.7	60.4	50.0	41.3	35.8
	充放電	125.2	80.7	60.4	50.0	41.3	35.8
		125.2	80.7	60.4	50.0	41.3	35.8
車両内電気二重層キャパシタへの充電電力 p_{chw} (kW)	最大値 (制限値)	349.0	183.0	125.0	101.0	81.0	70.0
	実効値	116.2	80.7	64.5	56.2	49.1	44.8
車両内電気二重層キャパシタへの充電電流実効値 i_{chw0} (A)		135.9	93.9	74.8	65.1	56.8	51.5

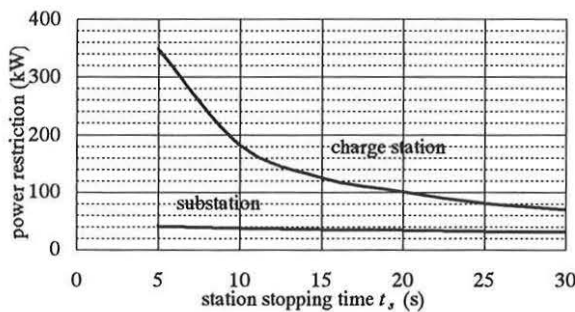


図 5 停車時間と制限電力

同様に 10 s の時の制限電力を 30 s の時と比べると充電ステーションでは 2 倍以上の変化が見られるが、変電所では 2 割程度しか変化しない。これにより、車両へ供給する電力が大きく変化しても変電所の制限電力の変化は少ないことがわかる。

4. 複数車両走行を模擬したシミュレーション

図 6 は複数車両を想定した充電ステーション系統で、1 変電所から 9 箇所の 0.5 km 毎の均等距離にある充電ステーションに給電する。なお、車両条件、路線条件、充電ステーション条件は 1 車両のシミュレーションと同一である。

既存の路面電車を参考に運転間隔を 2 分毎とすると上下線それぞれにおいて、およそ 2 駅に 1 車両が走行しており、この系統内では 9 車両が走行をしていることになる。各車両間隔は図 6 に破線で示すようにばらつきがあると考えられるが、最も変電所の負担が大きい場合を想定すると、全ての充電ステーションが 1 車両ずつを充電する場合が考えられる。この

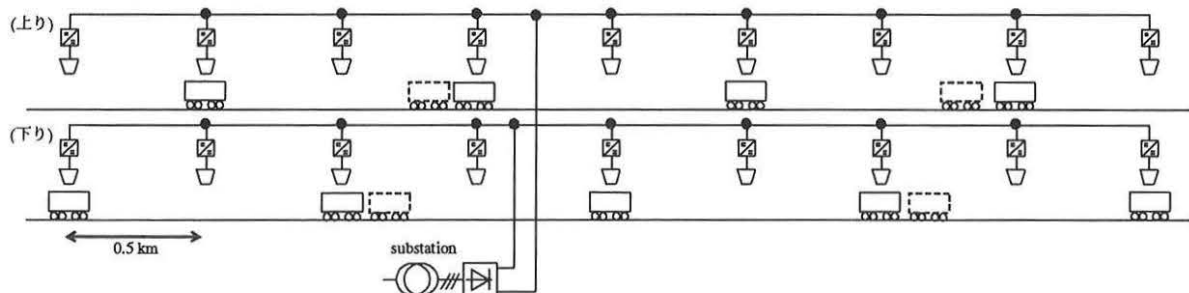


図 6 充電ステーション系統と複数車両走行

場合、9 車両を同時に充電することになり、変電所から充電ステーションへ供給される電力の最大値は 1 車両充電時 38.2 kW の 9 倍で 344 kW となる。

同一条件の架線集電方式では、力行時の 1 車両の電力の最大値が 215 kW で 9 車両が同時に力行した場合、変電所から供給される電力の最大値は 1935 kW となる。これにより、今回の条件では充電ステーションに電気二重層キャパシタを設置することにより、

変電所の最大電力を 80 % 程度小さくすることができ、電力の平準化が可能である。

5. まとめ

架線の無い路面電車方式の車両内および充電ステーションへの電気二重層キャパシタ適用を前提に、一般的車両条件、路線条件を設定したエネルギーシミュレーションを 1 車両のみと複数車両の両方の場合において行った。充電ステーションの電気二重層キャパシタ静電容量と、充放電電力最大値を電力変換装置で適切に制限することで変電所供給電力の平準化が可能である。今後は複数車両が異なる間隔で走行した場合や実際の路線に適用した場合のシミュレーションを行う。

参考文献

- 1) M. Avart, J. Chabas : "THALES: Hybrid tram-train without catenary using ultracapacitors", Word Congress on Railway Research, WCRR, Koeln, Germany (2001.11)
- 2) 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 年電気学会産総大会, 3-21, 2004.9
- 3) 細野, 山田, 高原, 山田 : 電気二重層キャパシタを用いた架線の無い路面電車の走行シミュレーション, 平成 17 年電気学会大会, 5-174, 2005.3
- 4) 山田, 細野, 高原, 山田 : 架線の無い路面電車の電気二重層キャパシタステーション充電エネルギーについて, 平成 17 年電気学会産総大会, 3-34, 2005.8