

2305 鉄道車両への電気二重層キャパシタ適用のモデル回路実験

[電] ○土岐 俊明 [電] 高原 英明 (明星大学)
[電] 山田 淳 (パワーシステム)

Experimental Results by Model Circuits with Electric Double Layer Capacitors for Railway Traction Applications

DOKI Toshiaki, TAKAHARA Eimei (Meisei University), YAMADA Jun (Power Systems)

This paper describes applications for the Electric Double Layer Capacitors (EDLCs) to the electric railway traction circuits. Applications of the EDLCs to traction circuits are still under development, however some examples for light rail systems can be considered. Charging and discharging test results of the series connected EDLC blocks by a model inverter and induction motor circuits with around 600V dc voltage are indicated. Charging and discharging efficiency of the EDLCs is also measured.

キーワード: 電気鉄道, 電気二重層キャパシタ

Keywords: electric railway, electric double layer capacitor

1. はじめに

今後の社会におけるエネルギー問題の顕在化に対し, 科学技術分野でのエネルギー利用率向上の研究が期待されている。さらに, 地球環境保護のため温暖化要因である二酸化炭素などの温室効果ガス排出削減も今後の主要な技術課題である。

鉄道分野ではエネルギーの有効利用として, 電気鉄道で一般化している電力回生ブレーキによるエネルギーリサイクルだけでなく, 新しい省エネルギーコンセプトの車両が研究されている。架線をなくして効率よいエネルギー放出, 回収ができるリチウムイオン電池車両や⁽¹⁾, 自動車技術と同様にディーゼルエンジンを持つハイブリッド方式車両の検討が行われている⁽²⁾。これら新しいコンセプトの車両は, 共通して一時的エネルギー蓄積手段を持つが, 電気二重層キャパシタ (EDLC), 二次電池, 回転体による機械的フライホイール装置が具体的に可能性がある。

電気二重層キャパシタは電力密度が高く, 短時間の充放電能力に優れ, また二次電池に比較して寿命が長い点が期待される⁽³⁾, 鉄道への適用の研究が行われている^{(4)~(10)}。

本稿では新コンセプト省エネルギー車両の概念的検討に加え, 高電圧回路用として電気二重層キャパシタの直列接続複数セルを用い, インバータと誘導電動機負荷でのモデル回路による充放電特性などの基礎実験を行った結果を述べる。これは, 実際の回路に比べて負荷容量は小さいが, インバータ等のパルス電流負荷に対する電気二重層キャパシタの動作確認等を行うものである。

2. 新コンセプト車両への電気二重層キャパシタ適用

<2・1> 新しいコンセプトの省エネルギー車両

今後のエネルギー消費低減や温室効果ガス排出低減に向けて, 鉄道技術においても新しいコンセプトの電気車両の研

究が行われている。

電気鉄道は電力回生ブレーキの有効利用も含めてエネルギー利用率は高いが, 一方で車両運行密度が低い電化区間ではブレーキ電力が回生されない点や, 非電化区間のディーゼル機関車両のエネルギー利用率が低い点などが問題とされている。

車両のブレーキエネルギー回収とリサイクルにはエネルギーを一時蓄積する大容量キャパシタ, 二次電池, 回転体フライホイールなどが有効であり, このうち電気的方法では電気二重層キャパシタ, およびリチウムイオン二次電池などが検討されている。電気二重層キャパシタは二次電池に対してエネルギー密度は劣るが, 電力密度は 10 倍程度期待できる場合もあり, 例えば駅間が短い軽量形路面電車のようにエネルギー消費が少なく, かつ短時間で加減速するものなどに適用の可能性がある。

<2・2> 省エネルギー車両への電気二重層キャパシタ適用

表 1 は新しいコンセプトの省エネルギー車両への電気二重層キャパシタ適用例を示す。

(1)の EDLC 無架線方式電気車両は, 路面電車として国外で検討が行われているが, 最近是国内でも注目されている。この利点はヨーロッパ等で架線や支柱により街並の歴史的景観を損ねないこと, また架線構築, メンテナンス, 電力損失等が低減できること等である。一方で, 短距離のステーション毎に急速充電装置を備えることが必要である。

この方式の例では, 車両 1 両の質量を 20000kg, 最高速度を 40km/h とし, 電気二重層キャパシタの電圧変動範囲を 400V~900V とすると約 5F, 1000V の電気二重層キャパシタが必要になり, 質量は 200kg 程度と概算される。

(2)のハイブリッド無架線方式電気車両は(1)に加えてリチウムイオン等の二次電池をバックアップとして持つもので, ステーション毎の頻繁な充放電は寿命の長い電気二重層キャ

表1 新しい省エネルギーコンセプト車両への電気二重層キャパシタ適用
Table1 Electric double layer capacitor applications to new energy saving railways.

車両種別	駆動回路	利点	問題点など
(1) EDLC 無架線方式 電気車両		・架線をなくし、景観の保全（国外の例） ・架線メンテナンス低減 ・架線電力損失低減 ・効率的電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減	・ステーション毎に急速充電設備を供える ・万一のEDLC放電による非常走行設備を備える
(2) ハイブリッド 無架線方式 電気車両		・架線をなくし、景観の保全 ・架線メンテナンス低減 ・架線電力損失低減 ・効率的電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減 ・頻繁な充放電はEDLCが分担 ・二次電池によるバックアップ	・ステーション毎に急速充電設備を供える
(3) 燃料電池 電気車両		・効率的電力発生による二酸化炭素排出削減 ・電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減	・燃料電池反応遅れ等をEDLCで補完する ・水素供給技術の確立
(4) シリーズハイブリッド ディーゼル電 気車両		・ディーゼルエンジン・発電機を小形化し、EDLCの蓄積エネルギーで加速 ・電力回生ブレーキによる使用エネルギー低減	・EDLC蓄積エネルギーと発電機容量の適正配分

バシタが分担し、電圧低下に対しては二次電池を対応させる。

(3)の燃料電池電気車両は自動車が開発されているが、水素の供給方法も含めて実用化にはまだ時間がかかる。燃料電池はブレーキ電力回収ができないため、反応遅れの補完作用も含めて電気二重層キャパシタ等の適用が必要である。

(4)のシリーズハイブリッドディーゼル電気車両は、一般的なものは国外の非電化区間用で用いられるが、最近では国内でも具体的検討が行われている。従来方式に対し、直流中間回路に電気二重層キャパシタによるエネルギー蓄積装置を用い

ることで、ディーゼルエンジン・発電機小形化の可能性やブレーキエネルギー回収の利点がある。なお、国外では機械的フライホイールを用いる例もある。

3. 列車走行模擬モデル回路実験

<3・1> 電気二重層キャパシタ電源による走行模擬

モデル回路実験は、表1に示したような電気二重層キャパシタを電源とする車両への適用を目的に行ったものである。

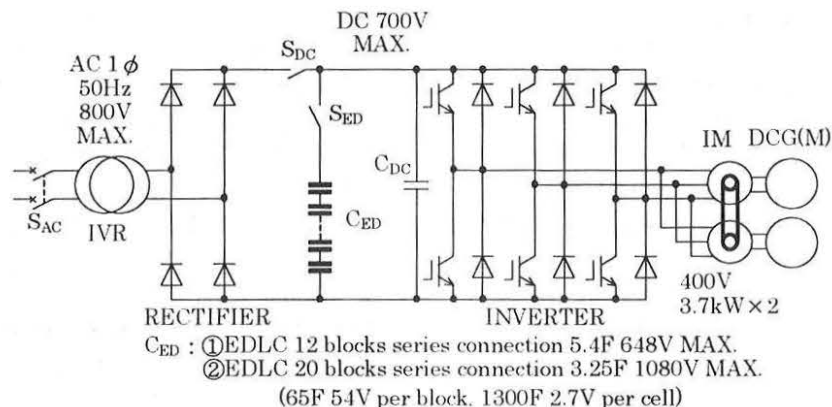


図1 実験回路

Fig.1 Model circuit.

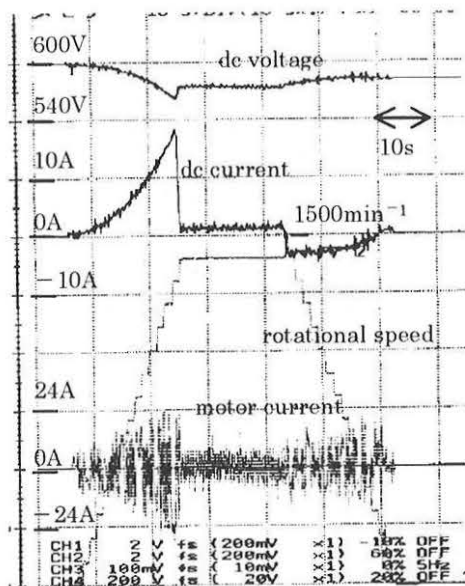


図2 キャパシタ電源走行模擬実験結果: $C_{ED} = 5.4(F)$
Fig.2 Train run simulation by capacitors: $C_{ED} = 5.4(F)$

インバータを電気二重層キャパシタに直接接続して動作させる場合の高周波電流による影響などは、未だ深く解明されていない。ここでは、インバータおよび誘導電動機負荷を接続し、力行・ブレーキによる充放電を行って動作への影響を確認するものである。

図1は電気車両を模擬した充放電実験モデル回路を示す。誘導電圧調整器IVRにより、最大電圧800V、50Hzの単相交流電源を直流電力に変換し、スイッチ S_{DC} と S_{ED} をオンにして電気二重層キャパシタ C_{ED} を充電する。直流電圧は電気鉄道を想定して600Vとし、インバータにより2台の3.7kW出力誘導電動機を並列に運転する。力行時は負荷を直流発電機、ブレーキ時は直流電動機により誘導電動機を発電機として駆動し、2台の誘導電動機はタイミングベルトで結合される。

電気二重層キャパシタ C_{ED} は、65F、54Vブロックを①12

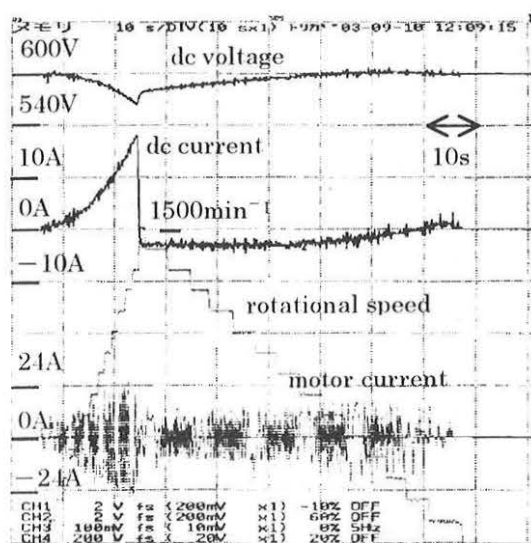


図4 充放電効率測定実験結果: $t_d = 17(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$
Fig.4 Charge and discharge efficiency measurement: $t_d = 17(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$

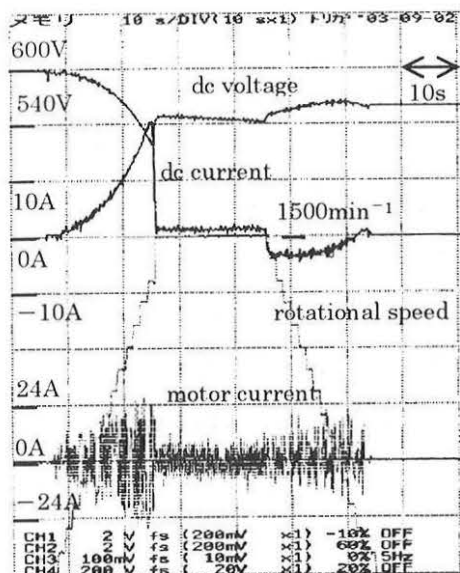


図3 キャパシタ電源走行模擬実験結果: $C_{ED} = 3.25(F)$
Fig.3 Train run simulation by capacitors: $C_{ED} = 3.25(F)$

直列とした5.4F、648V、および②20直列の3.25F、1080Vの2種類を用いた。測定は電気二重層キャパシタ C_{ED} を600Vまで充電後、スイッチ S_{DC} をオフして電気二重層キャパシタのみを接続して充放電を行った。

図2は $C_{ED} = 5.4(F)$ の電気二重層キャパシタのみを電源としたときの力行・惰行・ブレーキ走行1サイクルを模擬したものである。直流電圧は力行時に562Vまで低下し、約20sの惰行の後、回生ブレーキにより579Vまで充電される。直流電流は力行時に最大18.5A流れ、ブレーキ時は最大3.0Aのマイナス電流で充電される。同様に図3は電気二重層キャパシタ容量を $C_{ED} = 3.25(F)$ にして行ったもので、力行時の直流電圧は516Vまで低下し、直流電流最大値は20.5Aである。

<3・2> 充放電効率測定

電気二重層キャパシタを電源としてインバータおよび誘導

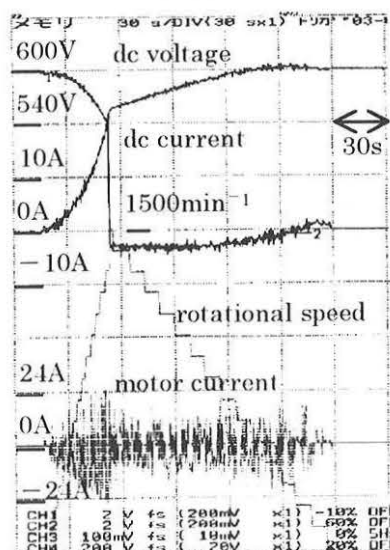


図5 充放電効率測定実験結果: $t_d = 33(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$
Fig.5 Charge and discharge efficiency measurement: $t_d = 33(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$

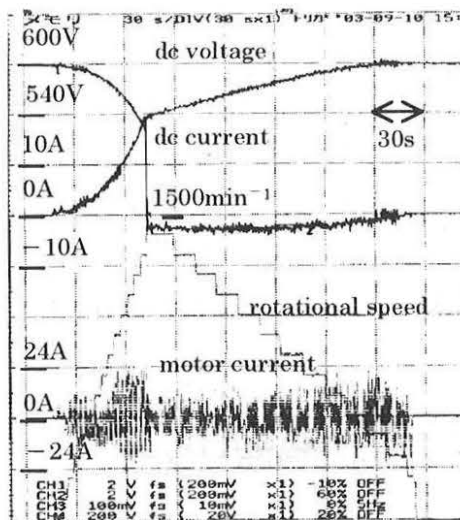


図6 充放電効率測定実験結果: $t_d = 57(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$
 Fig.6 Charge and discharge efficiency measurement: $t_d = 57(s)$, $C_{ED} = 5.4(F)$

電動機負荷による充放電を行うと、インバータ動作に起因する高周波成分が直流電圧に重畳し、電気二重層キャパシタに高周波電流が流れることが予想される。この影響の調査を目的に、以下の効率測定実験を行った。電気二重層キャパシタの放電電力量と充電電力量の比率から充放電効率を求めるため、回生ブレーキによる最終充電電圧が放電開始電圧と同一になるよう充電時間を設定した。

図4は $C_{ED} = 5.4(F)$ の電気二重層キャパシタのみを電源としたときの力行・回生ブレーキ1サイクルを表したもので、惰行は省略した。直流電圧は力行による放電時間 $t_d = 17(s)$ で600Vから564Vまで36V低下し、回生ブレーキによる $t_c = 55(s)$ の充電時間で開始時と同一の600Vまで充電する。放電電流実効値は $i_{def} = 10.3(A)$ 、充電電流実効値は $i_{cef} = 2.7(A)$ 、全電流実効値は $i_{ef} = 10.6(A)$ である。

図5はインバータ動作状態を変えるため、力行・回生ブレーキ時間を約2倍に設定したもので、図6は同様に動作時間を約3倍にしたものである。

表2は図4～図6それぞれの充放電時間、充放電電流実効値、電圧変動範囲、充放電電力量実測値を整理したもので、この結果から充放電効率 η_{ed} を計算により求めた。図4の場合、放電電力量 $E_d = 20.2(Wh)$ 、充電電力量 $E_c = 22.0(Wh)$ となり、これより充放電効率を計算すると $\eta_{ed} = 0.92$ となった。同様に図5は放電電力量 $E_d = 42.2(Wh)$ 、充電電力量 $E_c = 45.1(Wh)$ より、充放電効率は $\eta_{ed} = 0.94$ 、図6の場合は放電電力量 $E_d = 55.1(Wh)$ 、充電電力量 $E_c = 67.4(Wh)$ より、充放

電効率は $\eta_{ed} = 0.93$ になった。なお、実験開始電圧と終了電圧にわずかな差が生じた場合は電気二重層キャパシタの定格容量値と電圧差を用いて充電電力量を補正した。

表2の結果から、充放電効率 η_{ed} の中間値は0.93となるが、実験に使用した電気二重層キャパシタの定格電流は60Aであり、実効電流10～11Aの実験結果としては低い値となった。電気二重層キャパシタは静電容量が大きいため、高周波インピーダンスが小さくなる反面、直流電圧も十分に平滑されるので、高周波電流成分は両者の効果の兼合いになる。今後、この点に関して検討を継続する。

4. まとめ

新しい省エネルギーコンセプトの鉄道車両への電気二重層キャパシタ適用を考慮し、直流電圧600Vの車両駆動モデル回路により、電気二重層キャパシタを電源とした力行、惰行、ブレーキを1サイクルとする充放電実験を行った。充放電効率の実測値は0.93程度であるが、使用した電気二重層キャパシタの電流利用率が低い事を考えると小さめの値であり、今後の実験により高周波特性の影響を精査する。

文 献

- (1) 鮫島博・小笠正道・山本貴光:「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電気学会産業応用部門全国大会 No.3-34
- (2) 大澤光行・藤井威人:「NE トレインの開発」JREA, 46 巻 9 号 (2003.9)
- (3) 岡村迪夫:「電気二重層キャパシタと蓄電システム第二版」, 日刊工業新聞社 (2001.3)
- (4) 若狭倫大・高原英明・山田淳:「鉄道車両への電気二重層キャパシタ適用の検討」平13電気学会産業応用大会 33
- (5) 高原英明・若狭倫大・山田淳:「電気二重層キャパシタの鉄道車両への適用によるエネルギー利用率向上」, 鉄道連合シンポジウム J-RAIL 2001, S1-3-1 (2001.12)
- (6) 若狭倫大・高原英明・土岐俊明・山田淳:「電気二重層キャパシタの直列・並列モード切替と鉄道車両への応用」平成14電気学会全国大会 5-211
- (7) 若狭倫大・高原英明・山田淳:「鉄道車両モデル回路による電気二重層キャパシタ適用実験」平成14電気学会産業応用部門全国大会 33
- (8) 高原英明・土岐俊明・樋口健洋・若狭倫大:「鉄道車両への電気二重層キャパシタ適用を目的とした直列接続の基礎検討」電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-03-2, SPC-03-67 (2003.2)
- (9) 土岐俊明・樋口健洋・高原英明・山田淳:「鉄道車両への電気二重層キャパシタ適用を目的とした直列接続の基礎検討」平成15電気学会全国大会 5-221
- (10) 土岐俊明・高原英明・山田淳:「鉄道車両回路における電気二重層キャパシタ直列接続の検討」平成15電気学会産業応用部門全国大会 3-32

表2 充放電時間と電気二重層キャパシタ充放電効率 η_{ed} 計算結果

Table2 Charge and discharge efficiency η_{ed} to operation time.

実測データ	放電時間 $t_d(s)$	充電時間 $t_c(s)$	放電電流実効値 $i_{def}(A)$	充電電流実効値 $i_{cef}(A)$	全電流実効値 $i_{ef}(A)$	電圧変動範囲(V)	放電電力量 $E_d(Wh)$	充電電力量 $E_c(Wh)$	充放電効率 η_{ed}
図4	17	55	10.3	2.7	10.6	600-564	20.2	22.0	0.92
図5	33	108	11.1	2.6	11.4	600-540	42.2	45.1	0.94
図6	57	158	10.4	2.2	10.6	600-528	55.1	67.4	0.93