

S1-2-4

鉄道車両回路模擬フライホイール負荷による

電気二重層キャパシタ特性測定実験とシミュレーション

[電] ○細野俊樹, [電] 岩本陽亮, [電] 高原英明 (明星大学)

[電] 山田 淳 (パワーシステム)

Studies for the Electric Double Layer Capacitors with Railway Traction Fly Wheel Model

Toshiki Hosono Student member, Yousuke Iwamoto Student member,

Eimei Takahara Member (Meisei University)

Jun Yamada Member (Power Systems Co., Ltd.)

This paper describes applications of the electric double layer capacitors (EDLC's) to the railway traction circuits. The railway vehicle simulator with a fly wheel, composed of an induction motor and an inverter with 30 kW power is used for the discharge and charge tests with the EDLC blocks of 648 V. The circuit operation is also simulated by the computer, considering the capacitance variation depending on the voltage of the EDLC. Both the actual tests and the simulation show almost similar results, including the charge and discharge efficiency.

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. まえがき

現在, 地球温暖化防止対策として二酸化炭素に代表される温室効果ガス削減が進められている。電気鉄道は全体効率が低い輸送機関ではあるが, 電力平準化やエネルギー再利用のために電気二重層キャパシタを鉄道へ適用し, 一層の効率向上を試みる研究が行われている。

本稿では, 電気二重層キャパシタ電気鉄道駆動回路を模擬したフライホイールモデル装置を用い, 電気二重層キャパシタの充放電実験を行う⁽¹⁾。電気二重層キャパシタ特有の静電容量電圧依存性⁽²⁾⁽³⁾を反映した実験と, コンピュータシミュレーションにより充放電エネルギーを実測して充放電効率を評価する。

2. フライホイールを用いた鉄道駆動回路実験装置

2.1 フライホイール実験装置

フライホイール実験装置の主要諸元を以下に述べる。

フライホイール慣性モーメント : $J_w = 5.78 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$

フライホイール半径 : $r_w = 0.25 \text{ (m)}$

フライホイール長さ : $l_w = 0.12 \text{ (m)}$

フライホイール質量 : $m_w = 185 \text{ (kg)}$

フライホイール最高回転速度 : $s_w = 3000 \text{ (min}^{-1})$

誘導電動機容量 : $p_m = 30 \text{ (kW)}$

誘導電動機電圧 : $v_m = 400 \text{ (V)}$

誘導電動機最高回転速度 : $s_r = 1500 \text{ (min}^{-1})$

誘導電動機軸からフライホイール軸への増速比率 : 2

誘導電動機は 30 kW 三相インバータで駆動し, フライホイールはベルト結合により 2 倍の速度に増速される。

図 1 はフライホイール装置を示し, 右側はフライホイール装置全体で, 左側はフライホイール回転部本体である。

2.2 実験回路

図 2 は実験に用いるフライホイール負荷による車両駆動模擬回路である。三相 200 V 交流電源から誘導電圧調整器で 0 ~ 440 V まで電圧を変化させ, 電気二重層キャパシタ C_1 を直流電圧 600 V に充電する。充電完了後は電気二重層キャパシタを電源としてインバータにより力行・電力回生ブレーキモードで誘導電動機 IM を駆動する。

電気二重層キャパシタは静電容量, 電圧が 65 F, 54 V のブロックを 12 台直列にし, 1 ブロックは直列 20 セルのため合

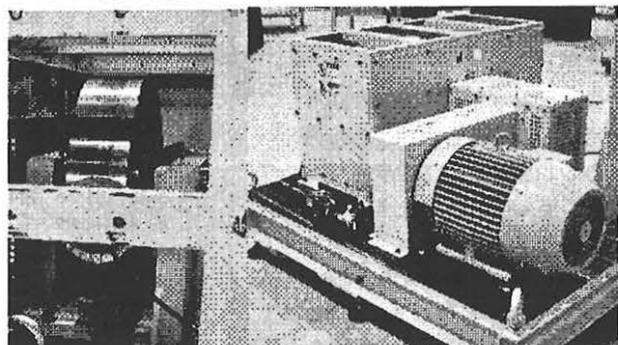


図 1 フライホイール装置

計 240 セル直列接続となる。

電気二重層キャパシタ全体の定数を以下に述べる。

定格静電容量： $C_1 = 5.4$ (F)

定格電圧： $v_{c1} = 648$ (V) (最高電圧 600 V で使用)

定格電流： $i_{c1} = 60$ (A)

内部抵抗値： $R_{c1} = 0.72$ (Ω)

2.3 実験条件

鉄道車両の運転を模擬して誘導電動機およびフライホイールの加速、減速時間を数通りに変化させ、電気二重層キャパシタが負担する電力を変化させた充放電実験を行う。この時の電気二重層キャパシタ電圧 v_{c1} 、電流 i_{c1} 、充放電エネルギー E_{c1} 、u 相誘導電動機電流 i_{mu} および誘導電動機回転速度 s_r を実測し記録する。

2.4 実験結果

図 3 は電気二重層キャパシタの負担する電力が約 23 kW で最大になる場合の電動機回転速度最大値 1500 min^{-1} までの代表的加速、減速データを表わし、電気二重層キャパシタ電圧 v_{c1} 、電流 i_{c1} 、u 相誘導電動機電流 i_{mu} および誘導電動機回転速度 s_r を表示している。加速、減速時間はそれぞれ 24 s、22 s で、1 サイクルの測定時間は力行から電力回生ブレーキへ移行する 2 s を含めて 48 s である。

電気二重層キャパシタ電流 i_c の力行時の最大値は 57.2 A、電力回生ブレーキ時の負の最大値は -40.0 A となる。また、各々の時点における電気二重層キャパシタ電圧 v_{c1} の力行の最低値は初期値 600 V から 405 V となり、電力回生ブレーキ終了時の電圧値は電気回路損失と機械損失により 534 V になる。このとき、直流電力 p_c の最大値は力行時で 23.2 kW、電力回生ブレーキ時で -19.4 kW となる。

また、u 相誘導電動機電流 i_{mu} の振幅は見かけ上変動が大きいですが、測定器の影響によるもので実際は全領域でほぼ同等の電流値である。

3. 実験結果の整理と評価

3.1 電気二重層キャパシタ内部電圧

図 4 は図 3 の実測データから各種数値を計算し整理したものである。●の電気二重層キャパシタ電圧 v_{c1} の実測値に対し、○の電気二重層キャパシタ内部電圧 v_{c1} は電気二重層キャパシタ電流 i_{c1} と内部抵抗値 R_{c1} を用いて次式より予想値として求めた。

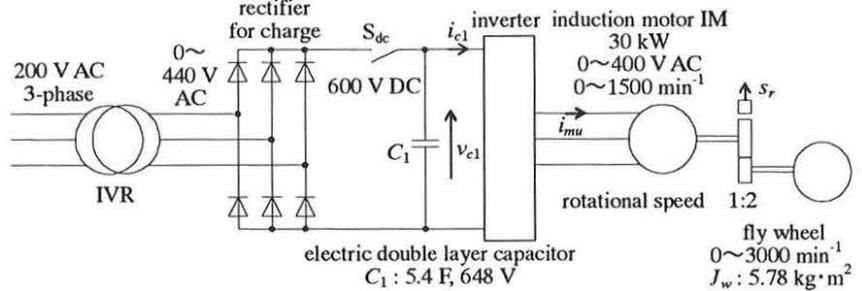


図 2 フライホイール駆動回路

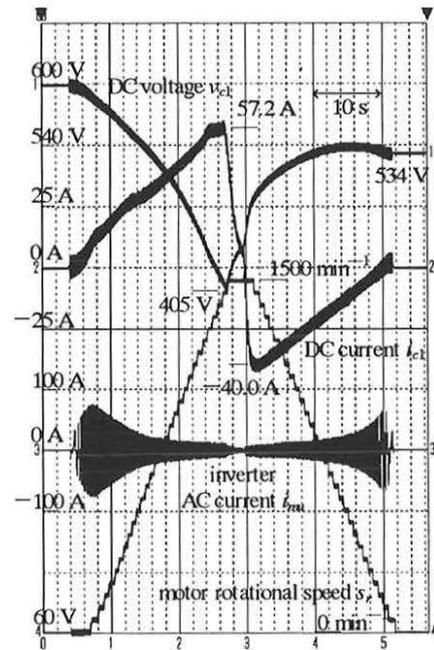


図 3 加減速実測データ

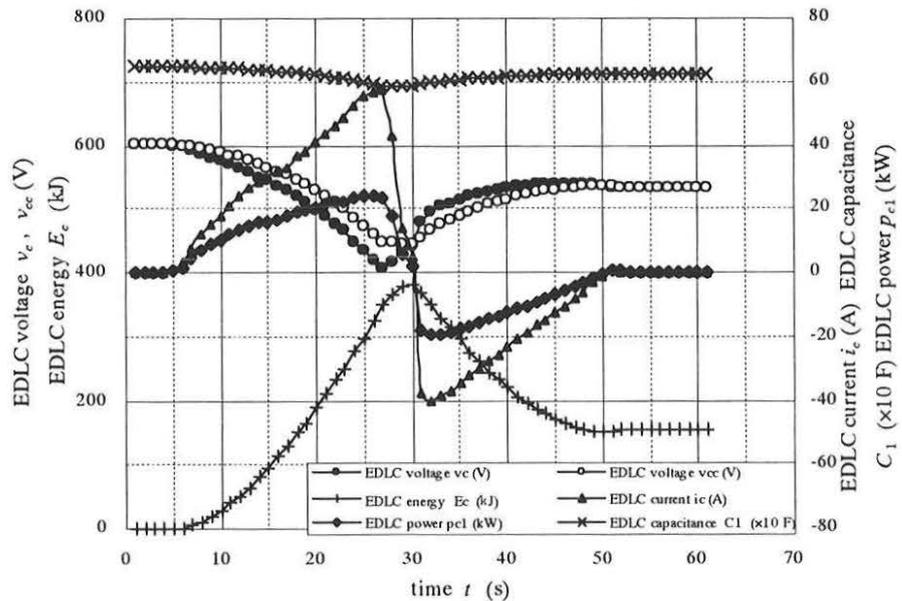


図 4 加減速データによる諸特性

$$v_{ce1} = v_{e1} + (i_{c1} \times R_{c1}) \text{ (V)}$$

上式において電気二重層キャパシタ内部抵抗値 R_{c1} は電流の値に拘わらず 0.72Ω 一定値としているが、これは先に行った実験より内部抵抗値の電流依存性は小さいことに基づいている。

◆は直流電力 P_{c1} を表し、実験と同様力行時で最大 23.2 kW、電力回生ブレーキ時で -19.4 kW である。

3.2 電圧依存性を考慮した静電容量

図5は実験に用いた 5.4 F, 648 V 電気二重層キャパシタの電圧に依存した静電容量特性である。この特性の具体的な求め方は、実験で使ったのと同じ電気二重層キャパシタブロックの一部を用い、一定値の小電流により充電および放電実験を行い、細かく区分した電圧区間毎の充放電エネルギーから静電容量を算出する方法による³⁾。この結果を電圧と静電容量で 5.4 F, 648 V に換算したもので、電気二重層キャパシタ電圧 v_{e1} が 0 V から 648 V に変化するのに対し、静電容量 C_1 は 3.3 F から 6.6 F と 5.4 F を中心に 2 倍の変化をする。これを式で表わすと以下のような電圧の二次関数となる。

$$C_1 = -0.00000313 v_{e1}^2 + 0.00708 v_{e1} + 3.33 \text{ (F)}$$

図4の×印は、先に求めた電気二重層キャパシタ内部電圧 v_{ce1} を用いて上式から電圧に対応した電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 を算出したものである。この結果、電気二重層キャパシタ内部電圧 v_{ce1} が 600 V から 446 V に変化するのに対し、電気二重層キャパシタ静電容量 C_1 は 6.5 F から 5.9 F となり、定格静電容量 5.4 F より大きめの領域で変化する。

3.3 充放電効率

図4の+印は電気二重層キャパシタエネルギー E_{c1} の変化の実測値であり、最大値は力行で 380 kJ、電力回生ブレーキ終了時は 153 kJ となる。これより、電力回生ブレーキによる回収エネルギーは最大値から電力回生ブレーキ終了時の値を引いた 227 kJ となる。この値を用いて、力行(放電)時は内部抵抗による損失エネルギーを差し引き、電力回生ブレーキ(充電)時は加えることで電気二重層キャパシタの充放電効率を求める。

表1は充放電効率の実測値とシミュレーション値を示し、実測の放電効率 η_{dc} 、充電効率 η_{ch} はそれぞれ、0.944、0.958 となる。ここで、放電エネルギーと充電エネルギーが異なるため、充放電効率 η_{ca} は単純には求められないが両者の積として計算すると 0.904 となる。

4. シミュレーションによる充放電特性の検討

4.1 シミュレーションの目的

電気二重層キャパシタの静電容量電圧依存性に関しては、内部の材料や製造方法の違いも含めて詳細な検証が必要である。特に今後の高エネルギー密度電気二重層キャパシタでは電圧依存性はより顕著になると言われている。

また、実験に用いたフライホイール装置は小形のため慣性モーメントに対する機械損失の比率が高く、これらを考慮した検討が必要である。

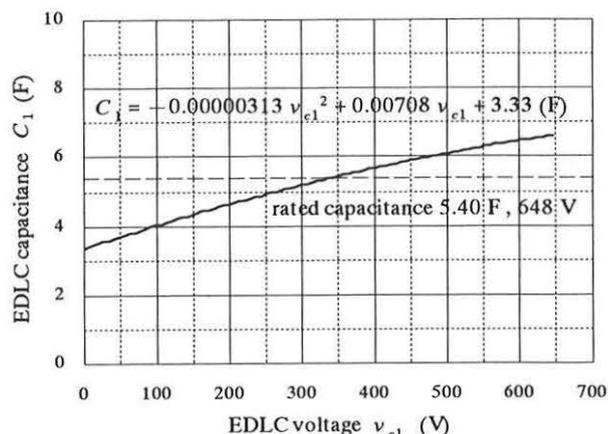


図5 電圧に依存した静電容量値

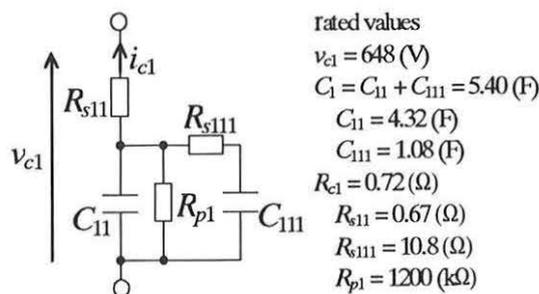


図6 5.40 F, 648 V 電気二重層キャパシタシミュレーションモデル回路

シミュレーションは、フライホイールのフリーラン状態での減速度から求めた実測の回転抵抗に加えて、実験結果を反映した機械損失の補正を行い、電気二重層キャパシタの充放電エネルギーを算出することを目的とする。これにより、電気二重層キャパシタの電圧による静電容量変化を精度高く反映して、今後の検討につなげる。

4.2 シミュレーション条件

2.1 で述べたフライホイール装置の仕様を用いて図2の駆動回路を模擬してシミュレーションを行い、力行、電力回生ブレーキなど実際の駆動状態を想定して、電圧、電流、電力、エネルギーおよび充放電効率を算出する。

図6はシミュレーションに用いた 5.4 F, 648 V の電気二重層キャパシタ内部等価回路モデルで、内部時定数が長いことによる電圧変化時間遅れを模擬するため、 C_{11} 、 C_{111} の 2 種類の静電容量による二段時定数構成とし、直列抵抗および並列抵抗は内部抵抗と漏れ電流経路を表わしている。

各静電容量値は電圧により変化するが、それぞれの中心値は一段目の静電容量 C_{11} は 4.32 F、分割した二段目の静電容量 C_{111} は 1.08 F で合計静電容量は 5.40 F となる。また、全体抵抗 R_{c1} を 0.72Ω とすると、直列抵抗 R_{s11} は 0.67Ω となり、二段目直列抵抗 R_{s111} は 10.8Ω 、並列抵抗 R_{p1} は $1200\text{ k}\Omega$ となる。このとき、一段目時定数は 2.9 s、二段目時定数は 12 s となる。

4.3 シミュレーション結果

図7は、図3および図4に示す実験結果と同一条件による電気二重層キャパシタ初期電圧 $v_{c1} = 600$ (V)、電気二重層キャパシタ静電容量 $C_1 = 5.4$ (F)のシミュレーション結果で、電動機回転速度 1500 min^{-1} までの加減速特性である。

フライホイール装置の回転抵抗は、最高回転速度からフリーランで減速するときの減速度を実測して計算により求め、シミュレーションに反映する。ただし、結合ベルトなどの機械損失があるため、力行およびブレーキモードそれぞれで実測値を参考に機械損失の補正を行う。

実験と同様、24 sで最高回転速度 1500 min^{-1} まで力行し、最高回転速度到達後は2 sの間フリーランを行い、その後は電力回生ブレーキにより22 sで停止する。力行時の電気二重層キャパシタ電圧 v_{c1} は600 Vから425 Vまで低下し、この時の電気二重層キャパシタ電流 i_{c1} の最大値は59.2 Aとなる。電力回生ブレーキでは電圧が554 Vまで回復し、ブレーキ電流の負の最大値は-40.8 Aである。また、力行電力最大値は25.2 kW、ブレーキ電力最大値は-20.2 kWで、共に実験値より多少大きくなっている。

電圧、電流、電力の瞬時値や最大値はこのように機械損失などの補正を完全に行うことは困難なため多少の誤差があるが、充放電時間とエネルギーを一致させることにより、電気二重層キャパシタの負担は実測に近い値とすることができる。

このような条件で行ったシミュレーションによる電気二重層キャパシタが負担する力行(放電)およびブレーキ(充電)エネルギーと、充放電効率を表1に示す。充放電エネルギーを実験値と一致させると放電効率 η_{dc} 、充電効率 η_{ch} はそれぞれ0.937、0.962となる。同様に充放電効率 η_{cd} を単純に放電と充電効率の積で算出すると0.901となり、実験値0.904にほぼ近い値となった。これにより、電気二重層キャパシタの充放電シミュレーションモデルは比較的現実に近いものが得られたと考えられる。

表1 充放電エネルギーと効率

		measured	simulated
motoring (discharge)	energy E_p (kJ)	380	380
	efficiency η_{dc}	0.944	0.937
brake (charge)	energy E_b (kJ)	227	227
	efficiency η_{ch}	0.958	0.962
charge and discharge efficiency η_c		0.904	0.901

5. まとめ

フライホイール負荷による車両駆動模擬装置を用いて、電気二重層キャパシタブロック定格値に近い電流による加速・減速での充放電実験を行い、同様にシミュレーションも電気二重層キャパシタの静電容量電圧依存性を反映させて行った。その結果、実験とシミュレーションで充放電時間、エネルギーを一致させればほぼ同等の充放電効率値を得ることができ、電気二重層キャパシタ内部特性を模擬できることがわかった。

参考文献

- 1) 細野・岩本・藪田・高原・山田:「鉄道車両回路模擬フライホイール負荷による電気二重層キャパシタ特性測定実験」電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-05-54 (2005.9)
- 2) 岩本・高原・山田:「電気二重層キャパシタの静電容量電圧依存性を考慮した鉄道回路への適用」平成17電気学会全大5-175 (2005.3)
- 3) 内田・高原・山田:「鉄道への電気二重層キャパシタ適用を考えた蓄積エネルギー電圧依存性の検討」平成17電気学会産応全大3-35 (2005.8)

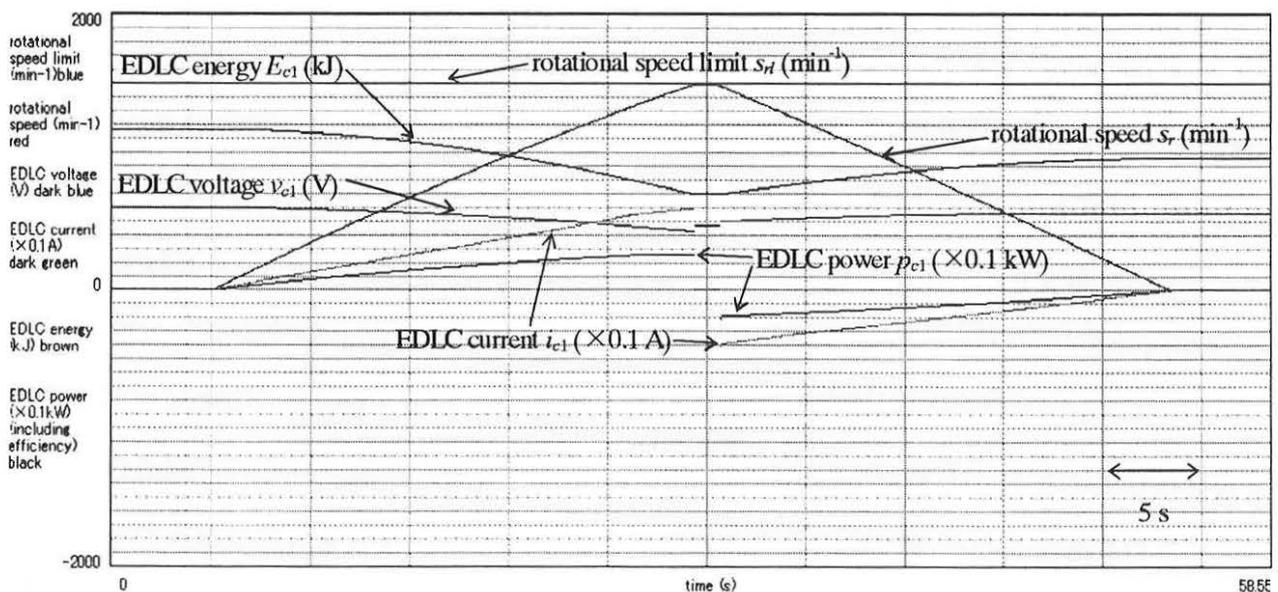


図7 フライホイール装置の動作シミュレーション