

分圧抵抗付き電気二重層キャパシタの等価回路

小松 将太*, 辻 俊明, 阿部 茂 (埼玉大学)

Equivalent Circuit of Electric Double Layer Capacitors with Balancing Resistors

Shota Komatsu, Toshiaki Tsuji, Shigeru Abe (Saitama University)

1. まえがき

電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor, 以下 EDLC) の等価回路はパワーエレクトロニクス解析用として、充電後 30 分程度までを対象とした RC3 段等価回路が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、RC3 段等価回路では、(1) 充電後数時間以上経つとシミュレーション誤差が大きくなる、(2) 分圧抵抗を付加するとさらに誤差が大きくなる、2 つの問題があった。エレベータなど昼夜で運行パターンが変化する用途では、充電後 12 時間程度までを対象とし、電圧アンバランス対策として分圧抵抗を付加した際にもシミュレーション精度を保てる等価回路が必要となる。

これらの対策として RC3 段等価回路を拡張した RC4 段等価回路および漏洩抵抗の補正法を提案し、実験で検証した。

2. RC3 段等価回路と RC4 段等価回路

図 1 に RC3 段および RC4 段等価回路をまとめて示す。1 段目に、電圧依存性を示す静電容量 C_{il} があり、右端の R_{lea} は漏洩抵抗を表す。時定数の異なる RC 回路の数で RC3 段、RC4 段を区別する。EDLC 外部に分圧抵抗 R_B を付加する。

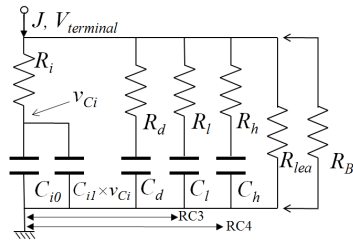


図 1 EDLC 等価回路
Fig.1. Equivalent circuit of EDLC

RC3 段等価回路では、1 段目は秒単位の、2 段目は分単位の、3 段目は 10 分単位の現象を模擬するために配置されており、30 分以上の現象は模擬できない。RC4 段等価回路では 100 分単位の現象を模擬させる RC 回路を追加する。

3. RC4 段等価回路の定数決定法

RC3 段等価回路で生じる長時間域での誤差を低減させるための RC4 段等価回路の定数決定法、および分圧抵抗付加時の漏洩抵抗の補正法を以下に示す。

<3・1>RC4 段等価回路の定数決定法 等価回路定数

表 1 電圧測定時刻
Table1. Measurement time
 $t=0$: charge start
 T_c : charging time

t_0	$T_c + 600[s]$
t_1	1800[s]
t_2	$T_c + 6000[s]$
t_3	43200[s]

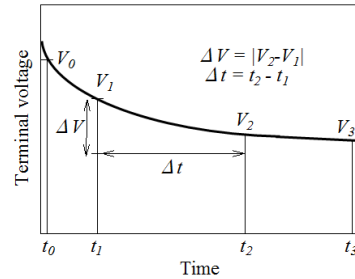


図 2 放電電圧波形
Fig.2. Terminal voltage curve

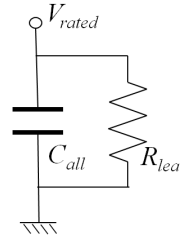


図 3 $C_{all}R_{lea}$ 回路
Fig.3. $C_{all}R_{lea}$ circuit

は、分圧抵抗なしで EDLC の充放電を行い得られる電圧波形から求める。定数決定法は測定精度の高い峯村らの方法⁽³⁾を用いた。RC4 段等価回路は 100 分単位の現象を模擬するために、RC3 段等価回路を拡張し R_h, C_h を追加する。表 1 に電圧測定時刻を示す。 R_h と C_h は (1),(2)式で求める。

図 2 のように、放電電圧波形の t_1 と t_2 の 2 点間の電圧差 ΔV と時間差 Δt から回路定数を計算する。 R_h, C_h 以外の RC 定数も同様に求めることができる。

$$R_h = \frac{V_1 - \Delta V/2}{C_{diff}(V_1)} \frac{\Delta t}{\Delta V}, \quad C_{diff}(V) = C_{i0} + C_{il} \times V \quad \dots\dots (1)$$

$$C_h = \frac{J \times T_c}{V_3} - \left(C_{i0} + \frac{C_{il} \times V_3}{2} \right) - C_d - C_l \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 J : 充電電流である。

<3・2>漏洩抵抗の決定法 定電流 J で充電後に定電圧 V_{rated} で 24 時間保持する。その後自然放電 24 時間後の電圧 V_{dis} を測定し漏洩抵抗 R_{lea} を求める。充電後、図 1 の全 C の電圧が V_{rated} 一定になり、放電時は図 3 の回路で近似できるため(4)式で R_{lea} を求める。放電時間 T_{dis} は $T_{dis}=24[hr]$ である。
 $C_{all} = C_{i0} + C_{il} \times V_{rated} + C_d + C_l + C_h \quad \dots\dots (3)$

$$R_{lea} = -\frac{T_{dis}}{C_{all} * \ln(V_{dis}/V_{rated})} \quad \dots\dots (4)$$

<3・3>分圧抵抗挿入時の漏洩抵抗の補正法 EDLC に使用する分圧抵抗 (今回は $3k\Omega$ ⁽²⁾⁽³⁾) を付加し補正漏洩抵抗 R_{leaB} を測定する。測定方法は<3・2>に示した方法と同様である。分圧抵抗付加時のシミュレーションは R_{lea} と R_B の並列部分を R_{leaB} に置き換えて行う。

4. 実験及びシミュレーション

〈4・1〉充放電実験方法 実験にはエルナー社 DYNACAP 2.5V 50F(低抵抗品: 型番 DZN)を使用した。数日間端子を短絡し EDLC の充電電荷を 0 にした後、定電流 $J=6[A]$ で定格 2.5V まで急速充電を行い、定格電圧到達後 (T_c : 約 20s) 直ちに電源を切り離し、12 時間の自然放電を行った。

〈4・2〉等価回路定数 分圧抵抗なしで充放電実験を行った結果(図 4)から〈3・1〉に述べた方法を用いて等価回路定数を求める。一方、漏洩抵抗 R_{lea} は〈3・2〉の方法により別途求める。求めた等価回路定数を表 2 に示す。また、〈3・2〉の方法で補正した漏洩抵抗 R_{leaB} も表 2 に示す。

〈4・3〉シミュレーション トロペゾイダル則を用いた節点解析法²⁾により行った。分圧抵抗なしの場合のシミュレーション結果を図 4 に、分圧抵抗ありの場合のシミュレーション結果を図 5 に示す。両図には充放電実験の測定値も示している。また、分圧抵抗ありの場合で漏洩抵抗を補正したシミュレーション結果を図 6 に示す。

5. 考察

〈5・1〉長時間域 図 4 をみると、RC4 段等価回路にすることで RC3 段等価回路では模擬しきれなかった 30 分を超える時間について誤差が 8% から 3% 程度に低減された。

〈5・2〉分圧抵抗ありの場合 図 5 をみると、12 時間経過時に RC3 段等価回路は 23% の誤差、RC4 段等価回路は 11% の誤差がある。しかし、まだ 10% 以上の誤差がある。

〈5・3〉漏洩抵抗の補正効果 分圧抵抗付加時の 12 時間経過後の精度をさらに向上させるため、〈3・3〉の漏洩抵抗の補正を行った。結果を図 6 に示す。漏洩抵抗を補正することで 12 時間経過時に RC3 段等価回路は 5%、RC4 段等価回路は 4% の誤差になり精度が向上した。表 3 に放電後 1 分、30 分、12 時間における各誤差をまとめた。

長時間域のシミュレーション精度を向上させるために RC4 段等価回路を用い、分圧抵抗付加時のシミュレーション精度を向上させるために漏洩抵抗の補正を行った結果、シミュレーション精度が向上した。

表 2 等価回路定数

Table2. Parameters

$R_i[\Omega]$	$R_d[\Omega]$	$R_j[\Omega]$	$R_h[k\Omega]$	$R_{lea}[k\Omega]$
11.4	14.3	233	1.41	24.0
$C_{i0}[F]$	$C_{i1}[F]$	$C_d[F]$	$C_i[F]$	$C_h[F]$
26.5	12.9	9.13	4.40	7.65
				$R_{leaB}[k\Omega]$
				1.71

($R_B=3k\Omega$)

表 3 実験値とシミュレーション値の誤差比較

Table.3 Error between measurement and simulation (%)

Circuit	without R_B (Fig.4)		with R_B (Fig.5)		with R_{leaB} (Fig.6)	
	RC3	RC4	RC3	RC4	RC3	RC4
1min	1.3	1.2	3.0	2.9	3.0	2.9
30min	0.1	-1.8	4.2	2.2	3.5	1.6
12hr	8.4	-3.0	23	11	5.4	-4.2

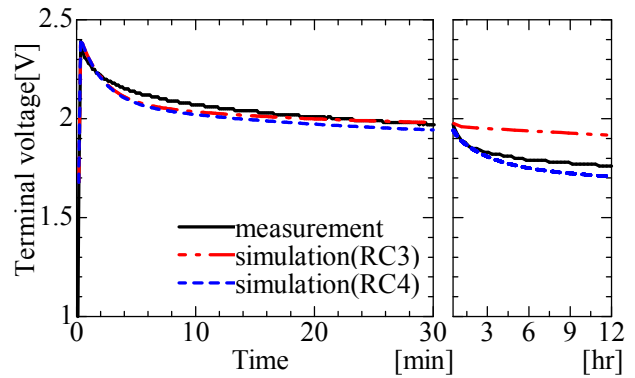


図 4 分圧抵抗なし

Fig.4. Comparison of measurement and simulation without R_B

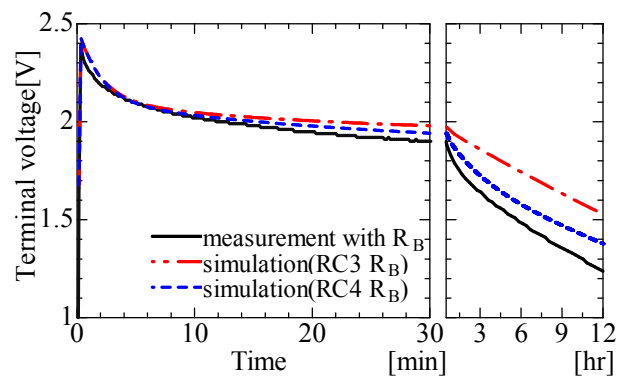


図 5 分圧抵抗あり

Fig.5. Comparison of measurement and simulation with R_B

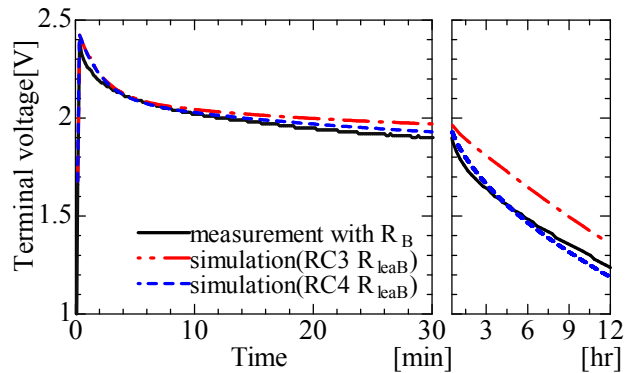


図 6 分圧抵抗あり(漏洩抵抗補正後)

Fig.6. Comparison of measurement and simulation with improved R_{leaB}

6. むすび

充電後数時間経つとシミュレーション誤差が大きくなる問題には RC4 段等価回路が、分圧抵抗付加時にシミュレーション誤差が大きくなる問題には漏洩抵抗の補正が有効である。

文献

(1)Zubieta *et al.*: IEEE Trans. I.A., Vol.36, No.1, pp199-205(2000)

(2)峯村他: 電学研資, SPC-08-22(2008)

(3)峯村他: 電学全大 平 19 No4-018(2007)