

燃料電池シミュレーションモデルにおける 内部パラメータ算出に関する検討

南出 雅裕¹⁾・田島 大輔²⁾・本部 光幸³⁾・大坪 昌久⁴⁾

Examination of Calculation of Internal Parameter of a Fuel Cell Simulation Model

Masahiro MINAMIDE, Daisuke TASHIMA, Mitsuyuki HOMBU, Masahisa OTSUBO

Abstract

Fuel Cell (FC) can not respond rapidly for a quick load change because chemical change in FC was not followed for a quick load change. To overcome it, the normal method is to enlarge the capacity of FC, which results in the efficiency decreasing. As another effective method, the electric power storage device like an Electric Double Layer Capacitor (EDLC) connected to a FC. A hybrid power supply system which combined a FC and an EDLC was constituted, and the response for quick load change has been checked. Also, in the case of the independent dispersed-type power source system actually used in a detached island or backup power is assumed. Then, it is necessary to verify operation of a dispersed-type power source system by a simulation. In this research, calculation and the simulation of the internal parameter including the output voltage V , output current I , the internal resistance R , the inductance L of FC were performed. First, it was necessary to determine an internal parameter of FC, the fundamental characteristics of the FC was measured and each internal parameter was simulated from the result. The simulated internal parameter was substituted for the simulation model created from the FC block diagram, and inductance presumption, output current calculation, and an output voltage calculation simulation were performed. Moreover, examination about the optimal internal parameter for a simulation was decided from the simulation result.

Key words :

Fuel Cell, MATLAB/Simulink, Simulation

1. はじめに

近年、地球環境保全の関心の高まりや電気事業の自

由化による分散型発電設備の期待から燃料電池 (FC: Fuel Cell) を用いた小型分散電源の導入が考えられている。しかし、FC は急峻な負荷変動への応答特性が悪いという欠点がある。そのため、電気二重層キャパシタ (EDLC: Electric Double Layer Capacitor) の補償用電源としての適用が注目されており、著者らは実験的に FC、EDLC によるハイブリット電源を構成し、その応答性

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) IR 推進機構 IRO 特任助教

3) 鹿児島工業高等専門学校 電気電子工学科教授

4) 電気電子工学科教授

について確認してきた¹⁾。しかし、離島や非常用電源で使用される独立分散型電源システムを想定すると長時間運転、大規模な設備になることが予想される。そこで、シミュレーションシステムを用い、制御回路などを模擬し、電源システムの動作を予測、確認する必要がある。本論文では、ハイブリッド電源の主電源である燃料電池に注目し、シミュレーションを用いた内部パラメータの算出に関する検討を行ったので報告する。

2. 実験内容

まず、燃料電池の出力波形に含まれるノイズを除去するためにオシロスコープの遮断周波数の決定を行った。次に、燃料電池の内部抵抗を一定値としてインダクタンスの推定を行った。得られた結果から、電圧波形の立ち下がり部分を模擬するために抵抗値を可変としてシミュレーションを行った。最後に、4つの内部パラメータを電流の関数にして出力電圧の算出シミュレーションを行った。

3. オシロスコープの遮断周波数の決定

3.1 実験方法

図1に燃料電池モジュールモデル及び実験回路を示す。燃料電池の内部起電力を表す式を式(1)に示す。式(1)のパラメータは E_d :内部起電力, R :内部抵抗, L :インダクタンスとする。図1に示すように、燃料電池に直流電子負荷装置を接続し、電流をステップ状に $0 \rightarrow 10$ [A]と変化させ、オシロスコープのローパスフィルタの遮断周波数を40[kHz], 80[kHz], 160[kHz]として応答特性を測定した。

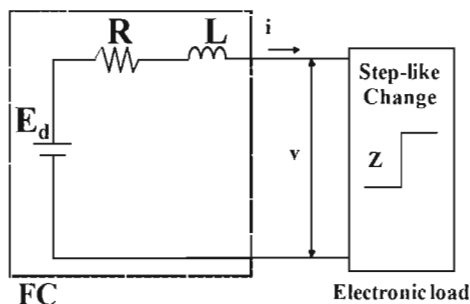


図1 燃料電池モジュールモデル及び実験回路。

$$E_d = v + Ri + L \frac{di}{dt} \quad \dots (1)$$

3.2 実験結果

ステップ入力電流に対する燃料電池の応答特性の実験結果の周波数による比較を図2に示す。どの周波数においても、電圧波形のトリガ状のノイズは除去できているが、電流波形を見ると、40[kHz]では他と比較して原波形との誤差が大きい。この結果からローパスフィルタの遮断周波数は、80[kHz]とするのが適切であることが分かったため、本論文でモデルに与える電圧電流波形はすべて遮断周波数80[kHz]でフィルタ処理した波形とする。

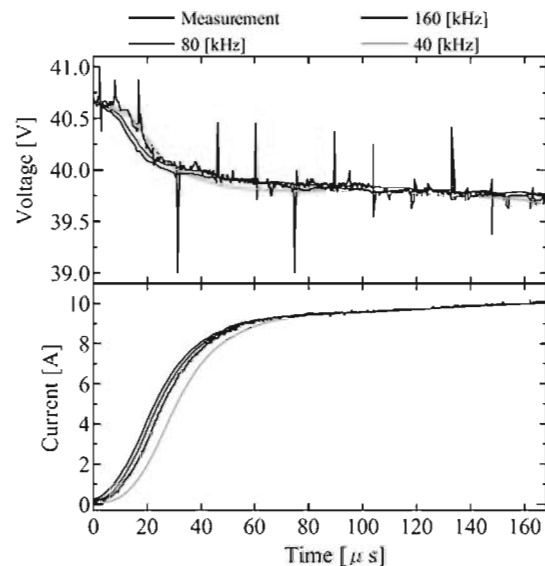


図2 周波数による比較。

4. 抵抗値一定でのシミュレーション

4.1 実験方法

内部起電力は初期値電圧、内部抵抗は初期値電圧と最終値電圧の差を最終値電流で割った値とした。また、インダクタンスの推定、出力電流の算出では、最終値電圧を電流の立ち上がりの時間まで(短時間と定義)とし、出力電圧の算出では、最終値電圧を電圧の立ち下がり時間まで(長時間と定義)とした。内部起電力、短時間での内部抵抗と長時間の内部抵抗を算出すると、それぞれ40.91[V], 110[mΩ]と780[mΩ]となった。応答特性実験で得られた波形とこれらの設定値を用いて、

インダクタンスの推定, 出力電流の算出, 出力電圧の算出のシミュレーションを行った。式(1)から変形した式(2), 式(3), 式(4)でそれぞれインダクタンスの推定, 出力電流の算出, 出力電圧の算出を行う。それぞれをモデル化すると図3, 図4, 図5のようになる。ここで, 図3をインダクタンス推定モデル, 図4出力電流算出モデル, 図5出力電圧算出モデルと呼ぶ。シミュレーションソフトには, Math Works社のMatlab/Simulinkを用いた。

$$L \frac{di}{dt} = E_d - v - Ri \quad \dots (2)$$

$$i = \frac{1}{L} \int (E_d - v - Ri) dt \quad \dots (3)$$

$$v = E_d - Ri - L \frac{di}{dt} \quad \dots (4)$$

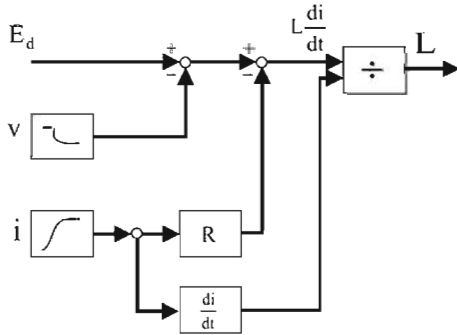


図3 インダクタンス推定モデルのブロック図.

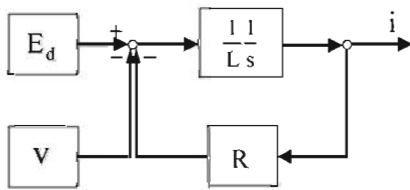


図4 出力電流算出モデルのブロック図.

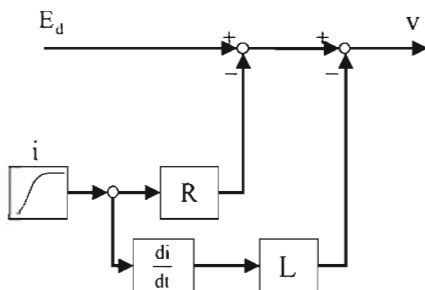


図5 出力電圧算出モデルのブロック図.

4.2 実験結果

インダクタンス推定結果を図6に示す。インダクタンスは, 電流が変化する部分で発生するため, 電流変化領域での平均値とした。その結果, 電流変化領域(16.1~48.6[μs])でのインダクタンスの平均値は 1.67[μH]となった。次に, この値を用いて出力電流算出シミュレーションを行った。出力電流算出結果を図7に示す。図7より, 実測値とシミュレーション値はほぼ一致する結果となった。そこで, 出力電圧算出モデルを用いて実験で得られたパラメータの確認を行った。電流を0→10[A]と変化させた時の出力電圧算出結果を図8に示す。図8から, 実測値とシミュレーション値は, 一致せず電圧の立ち下がり部分を模擬できていない結果となった。この原因は, 燃料電池モジュールの制御回路により出力が制御されているため, 電流が立ち上がったと同時に, 電圧値も立ち下がるのではなく, 電流の変化が終わった後も電圧値が低下し続けているものと考えられる。この電圧の立ち下がり部分を模擬するためには, 抵抗値を一定ではなく可変にする必要がある。

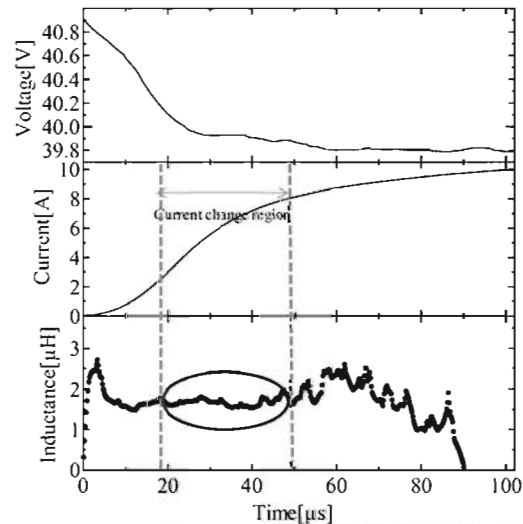


図6 インダクタンス推定結果(抵抗値一定).

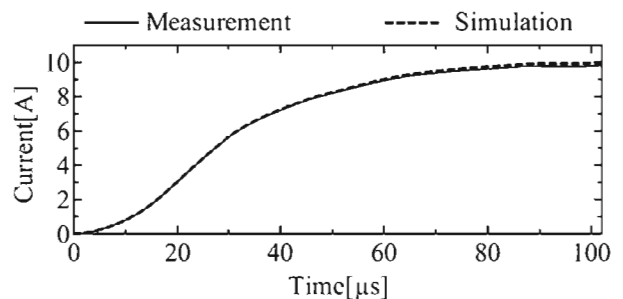


図7 出力電流算出結果(抵抗値一定).

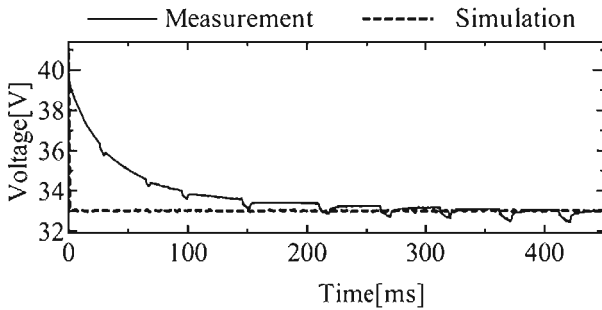


図8 出力電圧算出結果(抵抗値一定).

5. 抵抗値可変でのシミュレーション

5.1 実験方法

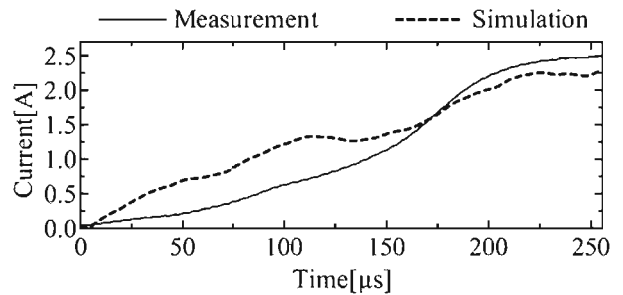
電圧降下を模擬するための可変抵抗の式を式(5)に示す。式(5)のパラメータは T:時定数, R_{∞} :長時間の内部抵抗, R_0 :短時間の内部抵抗とした。また, 電流の変化を $0 \rightarrow 10[A]$ だけでなく $0 \rightarrow 2.5[A]$, $0 \rightarrow 5[A]$, $0 \rightarrow 7.5[A]$ とした時の応答特性も調べ, インダクタンスの推定, 出力電流の算出, 出力電圧の算出シミュレーションを行った。

$$R_t = \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) (R_{\infty} - R_0) + R_0 \quad \dots (5)$$

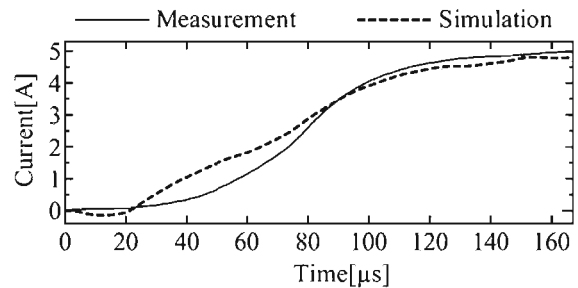
5.2 実験結果

各出力電流算出結果を図9に示す。図9(d)より, 実測値とシミュレーション値を比較すると抵抗値が一定の時と同様に, 抵抗値を可変にした場合でもほぼ一致する結果となった。他の電流値の結果を見ると, 図9(a)の出力電流算出結果は, 実測値とシミュレーション値の比較で最大で $0.5[A]$ 程度の差が見られる。また, 図9(b)は, 最大で $1.7[A]$ 程度の差, 図9(c)は, 最大で $1.3[A]$ 程度の差がみられる。これらの結果を見ると電流が小さくなるにつれてノイズの影響が大きくなっていると考えられる。しかし, 差が最も大きい $0 \rightarrow 2.5[A]$ の $0.5[A]$ の差の場合であっても, 実測値とシミュレーション値の時間間隔の差は $50[\mu s]$ であるので, 問題ないレベルで模擬できていると考えられる。次に, これらから得られたパラメータを確認するための出力電圧算出シミュレーションを行った。各出力電圧算出結果を図10に示す。図10より, 実測値とシミュレーション値を比較

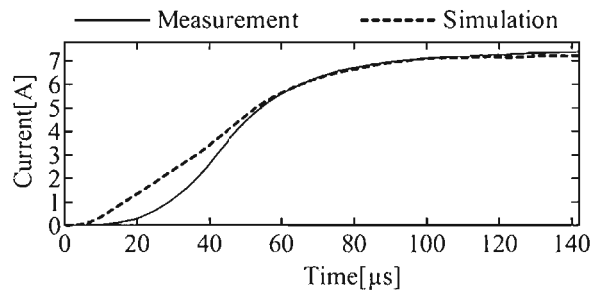
すると一部に誤差が見られるが, 実際の負荷変動では, 電圧値が $10[V]$ 程度変化するので, 問題ないレベルで模擬できている。また, インダクタンス推定結果で電流によりインダクタンスの値が変化していたが, これはFC内部の温度変化が原因と考えられる。



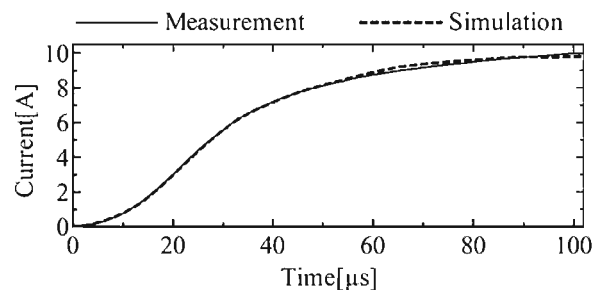
(a) $0 \rightarrow 2.5[A]$



(b) $0 \rightarrow 5[A]$

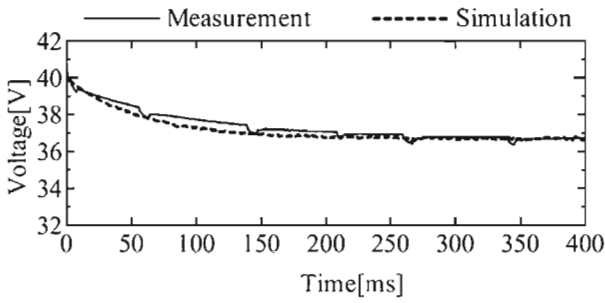


(c) $0 \rightarrow 7.5[A]$

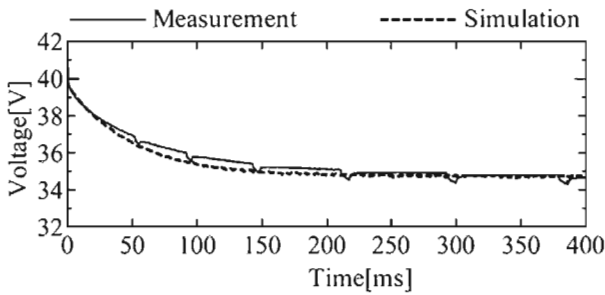


(d) $0 \rightarrow 10[A]$

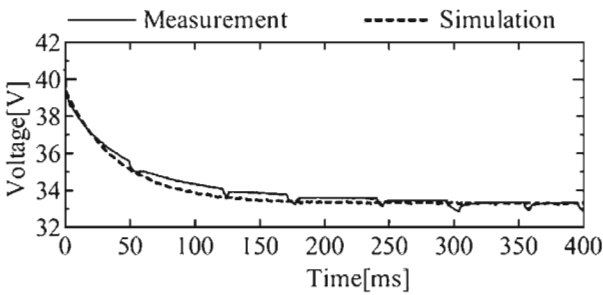
図9 各電流における出力電流算出結果(抵抗値可変).



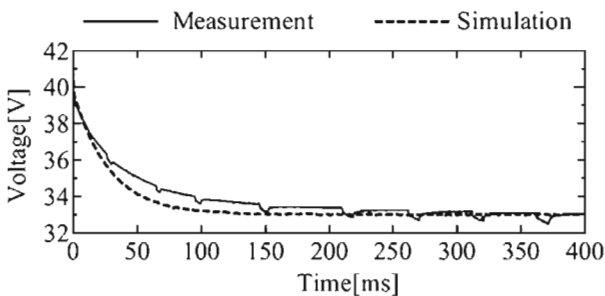
(a) 0→2.5[A]



(b) 0→5[A]



(c) 0→7.5[A]



(d) 0→10[A]

図 10 各電流における出力電圧算出結果(抵抗値可変).

6. T, R₀, R_∞, L 可変での出力電圧算出シミュレーション

6.1 実験方法

内部抵抗可変の出力電圧算出の設定値を表 1 に示す。表 1 より T:時定数, R₀:短時間での内部抵抗, R_∞:長時間での内部抵抗も電流によって変化していることが分かったため, それぞれのパラメータを, 二次関数で近似した。内部パラメータの近似式を式(6)から式(9)に示す。時定数, 短時間での内部抵抗, 長時間での内部抵抗, インダクタンスを可変にして出力電圧の算出シミュレーションを行った。

表 1 出力電流算出の設定値(抵抗値可変).

i[A]	E _d [V]	T[ms]	R ₀ [mΩ]	R _∞ [Ω]	L[μH]
0→2.5	40.41	59	180	1.46	3.14
0→5	40.52	51	169	1.14	2.96
0→7.5	40.53	41	145	0.95	2.24
0→10	40.91	28	110	0.78	1.71

$$R_0[m\Omega] = -0.96i^2 + 2.64i + 179.5 \dots (6)$$

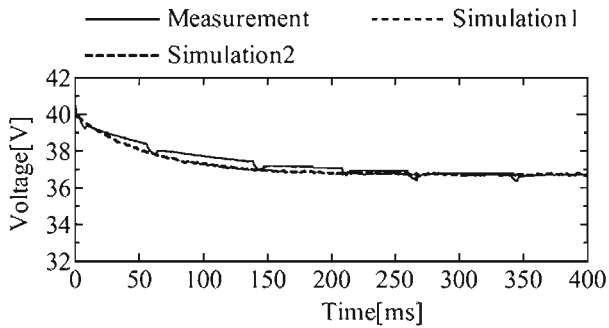
$$R_\infty[\Omega] = 0.006i^2 - 0.164i + 1.828 \dots (7)$$

$$T[ms] = -0.2i^2 - 1.62i + 64.25 \dots (8)$$

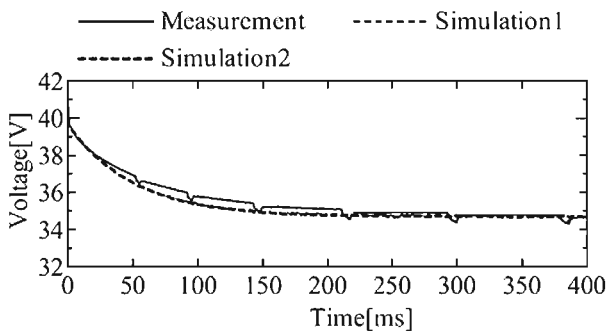
$$L[\mu H] = -0.014i^2 - 0.025i + 3.328 \dots (9)$$

6.2 実験結果

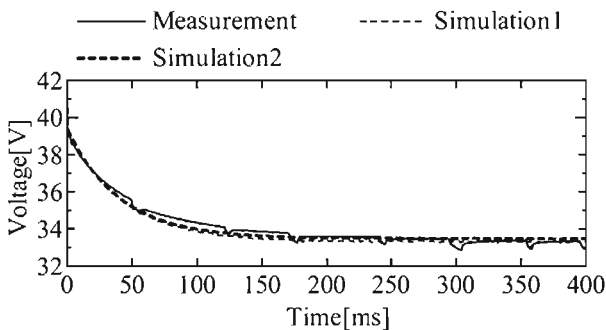
出力電圧算出結果を図 11 に示す。図 11 の Simulation1 は内部抵抗を可変にした結果, Simulation2 は時定数, 短時間での内部抵抗, 長時間での内部抵抗, インダクタンスを可変とした時の結果とする。実測値と Simulation2 を比較すると 0→10[A]の波形で最大 1[V]程度の誤差が見られるが, 負荷変動を考慮すると問題無いものと考えられる。また, Simulation1 と Simulation2 の結果はほぼ一致しており, 内部パラメータを電流の関数で近似することにより, 各々の電流に対して, 内部起電力以外のパラメータを変更することなく燃料電池の出力波形を模擬することができた。



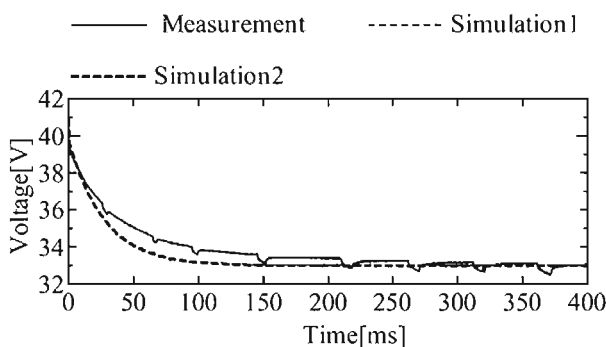
(a) 0→2.5[A]



(b) 0→5[A]



(c) 0→7.5[A]



(d) 0→10[A]

図 11 出力電圧算出結果(T , R_0 , R_{∞} , L 可変).

7. まとめ

本論文では、内部パラメータ(内部起電力、内部抵抗、インダクタンス)の算出及びシミュレーションを行い、シミュレーションに最適な内部パラメータ算出に関する検討を行った結果、以下のことを確認した。

(1)燃料電池の出力波形に含まれるノイズを除去するためにオシロスコープの遮断周波数の決定を行った。その結果、遮断周波数は、原波形との誤差が小さくノイズも除去できている 80[kHz]とした。

(2)燃料電池の内部抵抗を一定値としてインダクタンスの推定を行った。その結果、インダクタンスの値は 1.67[μ H]となり、この値を用いて行った出力電流の算出シミュレーションでは、実測値とほぼ一致する結果が得られた。

(3)電圧波形の立ち下がり部分を模擬するために抵抗値を可変としてシミュレーションを行った。その結果、電圧波形の立ち下がり部分を模擬することができ、電流値を変化させても、実測値とシミュレーション値はほぼ一致する結果となった。また、これらの結果からインダクタンス、内部抵抗、時定数が電流の関数で近似することができた。

(4)電流の関数によって可変にした 4 つの内部パラメータを用いて出力電圧算出シミュレーションを行い、出力電圧波形を模擬することができた。また、電流によって発生する熱を考慮し、パラメータを可変にすることによって電流値によらず電圧波形を模擬できることが分かった。

参考文献

- 1) 田島大輔, 佐藤逸人, 平田優心, 大坪昌久, 本田親久, 本部光幸:「負荷投入時の電気二重層キャパシタの応答性に関する基礎的検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.127, No.10, pp.1087-1093, 2007 年