

蓄電池直並列接続時の特性および課題

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： 蓄電池
リチウムイオン電池
直並列接続
充放電特性

Key Words : Battery
Lithium Ion Battery
serial-parallel connection
charge-discharge characteristic

Characteristics and Assignment of Serial-Parallel connected Batteries

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.
Yasunobu Tada

Abstract

Generally a battery consists of many serial-parallel connected cells. The performance of a battery declines due to the differences of characteristics between cells that constitute the battery. If an old battery and a new battery can be connected in parallel, the capacity of the batteries is enlarged easily. We investigated the characteristics and the assignments of series-parallel connected batteries, and figured that the connection an old battery and a new battery in parallel is practicable.

1. はじめに

蓄電池を構成する単電池の電圧は電気化学的に規定され数V（～5V）であり、蓄電池として実用的な電圧を確保するには直列接続が不可欠である。また、単電池の容量は製造技術の制約から数十Ah程度であり、実用的な蓄電装置容量を確保するには多数の単電池を並列接続して使用する必要がある。例えば東北電力では、定置用蓄電装置として容量4万kW2万kWhのリチウムイオン電池を使った蓄電装置を建設している。この蓄電装置に使われている単電池の容量は約50Whであり、約40万個の単電池を組み合わせて構成している。

単電池の直並列接続には注意が必要なことはよく知られている。特に直列接続において早く放電完了した単電池が発生すると、放電完了した電池にとって他の電池電流は逆方向からの充電となり分解反応が発生し、電池は爆発的に破壊される。同じ電圧仕様の電池間の並列接続では、電池が破壊することはまずないが、電池特性の差異により電池間に電流アンバランスが発生し、充放電が均等に行われなくなり、電池間には循環電流が発生する。

このような理由から単電池を多数直並列接続して構成する蓄電装置においては、単電池の特性は極力揃えて製造される。しかし、経年変化により個々の単電池の特性差が徐々に大きくなることは避けられず、程度の差はあるものの、特性に差のある単電池を多数直並列した状態で運用されることになる。

また、蓄電装置の寿命は15年程度が想定されているが、その間に蓄電容量は30%程度減少することが予想されている。寿命期間中に必要容量を確保するためには、蓄電容量減少を見越して初期容量をかなり大きくする必要があり、経済性を損ねる。そこで、初期容量を小さめにして容量減に応じて電池を追加することが考えられる。

以上のように蓄電装置の実際の運用においては、程度の差はあるものの特性差のある単電池が多数直並列接続された状態で充放電されることが普通と考えられる。特性差のある電池を直並列した際にどのような現象が発生し、運用上の課題は何かを明らかにすることを目的として、実験とシミュレーションによる検討を実施した。

2. 運用中の蓄電池容量増強

蓄電装置は蓄電池容量が大きいほうが運用性がよく、

長期的に価格が低下すると予想されるため、運用中に蓄電池容量を増強することは十分あり得ると考えられる。

また、蓄電池は劣化が早く耐用年数（約15年）で放電容量は初期値の70%程度（ $\Delta 2\%/年$ ）まで低下すると予想されている。蓄電池の必要容量は運用シミュレーション等で求めることができるが、耐用期間中蓄電池の放電容量を必要容量以上に維持するには、初期に大きな容量が必要となる。経済性からは初期容量を小さめにして、途中で増強するほうが現実的と考えられる。

ここで簡単のために蓄電池寿命を14年（容量は14年間で30%減 $2.14\%/年$ の減）とし、7年後に必要な容量を追加することを考える。なお、蓄電池容量は5%の裕度を見て、必要容量の105%以上確保することとする。

(1) 7年後に最小限の容量を追加する場合

途中で追加しない場合の初期容量は必要容量に対して

$$105 / 0.7 = 150\%$$

7年後に追加する場合は、7年後に105%以上あればよいので初期容量は、

$$105 / 0.85 = 124\%$$

124%の14年後の容量は、

$$124 * 0.7 = 86.8\%$$

7年後に追加する容量は、7年後に

$$105 - 86.8 = 18.2\%$$

以上の容量が必要なことから

$$18.2 / 0.85 = 22\%$$

(2) 7年後に追加した蓄電池を再利用する場合

途中で追加した蓄電池は7年間しか使用しないため、再度途中追加の蓄電池として再利用可能である。再利用を行うためには、7年後に22%以上の容量が必要である。

$$22 / 0.85 = 26\%$$

追加蓄電池の容量は26%あればよい。

初期容量（124%）+追加容量（26%）=150%で初期容量を大きくする場合（150%）と同じ容量であり、同じ容量を分割設置するともいえる。

初期容量を150%する場合と、初期容量を124%として7年後に26%追加する場合の経済性を比較する。コストは金利を4%とした現価累計で比較し、あわせて電池価格の低下（ $\Delta 30\%$ ）や追加電池の再利用も比較した。比較結果を表-1に示す。単純な分割設置でも

効果があるが、追加電池の再利用の効果が大きい。また、当然のことながら電池価格低下の効果も大きい。

蓄電池を設置する場合、性能低下を考慮して初期容量を大きくするより、途中で追加する方法のほうが経済性が高いといえる。ただし、同じ仕様の電池が入手できることが前提となる。

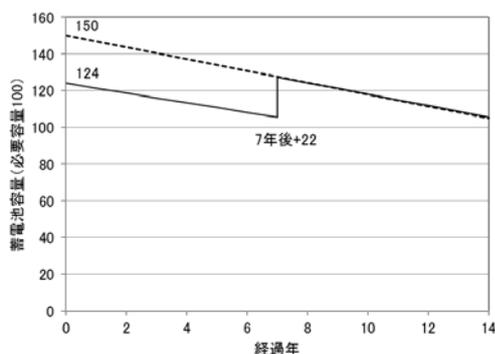


図-1 7年後に最小限追加する場合

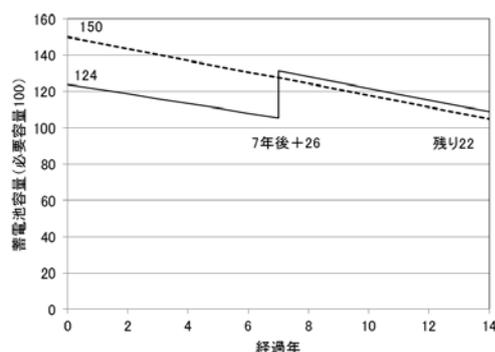


図-2 追加電池を再利用する場合

表-1 経済性比較 (金利4%)

シナリオ	現価累計
①容量減を見込んで最初に大きな容量を選定(基準)	100
②途中で容量減を補償する蓄電池を追加	96
③ ②と同じで蓄電池価格低下30%を見込む	92
④ ②と同じで蓄電池再利用を見込む	89
⑤ ②と同じで価格低下30%と再利用を見込む	87

このように運用途中で蓄電池を追加することは、直流側で新旧蓄電池を並列接続(直結)し、双方向インバータより交流側は何の変更もない極めてシンプルな方法であり、実用化できれば蓄電装置の運用性向上に役立つと考えられる。

3. 蓄電池並列接続

新旧蓄電池の並列接続においては、同仕様の蓄電池の新旧品の並列接続であることから、電圧特性(SOC-電圧特性)は同じである。ここで、SOC(State Of Charge)は蓄電池の充電量を示す指標であり、充放電電流積算値を蓄電池放電容量で除したもので、完全放電時を0%、満充電時を100%とする。

$$SOC = \int I(t)dt / (\text{放電容量} \times 36) [\%]$$

$$\text{放電容量} [\text{Ah}]$$

蓄電池の内部抵抗の増加により新旧電池間に電流不均衡が発生することが予想されるため、その特性を評価する。

3.1 蓄電池並列接続のシミュレーション

電池の等価回路を直流電圧源および内部抵抗で表現(ただし、電圧値と抵抗値はSOCの関数となり一定値ではない)し、2個の蓄電池を並列接続した場合の等価回路は図-3のとおりとなる。

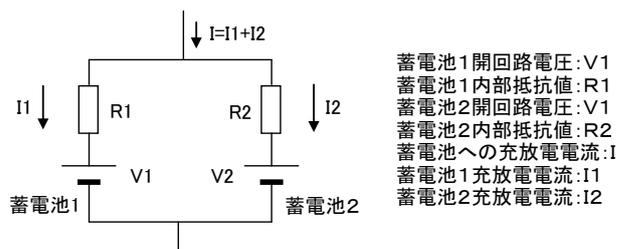


図-3 蓄電池の並列接続時の等価回路

回路方程式は、

$$I = I1 + I2$$

$$V1 + I1 \times R1 = V2 + I2 \times R2$$

この方程式を解くと

$$I1 = ((V2 - V1) + R2 \times I) / (R1 + R2) \quad \text{①式}$$

$$I2 = ((V1 - V2) + R1 \times I) / (R1 + R2) \quad \text{②式}$$

ここで、開回路電圧および内部抵抗値は電池SOCの関数であり、電池1, 2の開回路電圧特性は同じとする。

$$\text{開回路電圧 } V = Fv(SOC)$$

$$\text{内部抵抗値 } R = Fr(SOC)$$

$$SOC = \int I(t)dt / (\text{放電容量} \times 36)$$

上記方程式は非線形1次連立積分方程式となるため、数値計算で解を求める。

一次の積分方程式なので、オイラー法や改良オイラー法(ホイン法)で十分精度が出ると考えられることから、確認のためオイラー法と改良オイラー法で計算結果を比較した。ここで数値計算を実施するにあたり、

変数名や関数の特性を下記のとおりとした。

電池 1 SOC SOC1 電池 2 SOC SOC2

電池 1, 2 開回路電圧 $V=F_v(\text{SOC})$

電池 1 内部抵抗値 $R1=Fr1(\text{SOC1})$

電池 2 内部抵抗値 $R2=Fr2(\text{SOC2})$

電池のデータは公称 6.5Ah 単セル新品 (電池 1) および同仕様の劣化試験後旧品 (電池 2) の実データを使用した。なお、電池容量測定値は電池 1 : 6.38Ah、電池 2 : 4.82Ah であった。

開回路電圧測定結果を図-4に、電池 1、2 の内部抵抗測定結果を図-5に示す。内部抵抗値に関しては SOC10%以下で急激に上昇するが、うまく測定ができておらず SOC10%以下では内部抵抗値の誤差が大きくなる (シミュレーションと実測値があわない) ことが予想される。

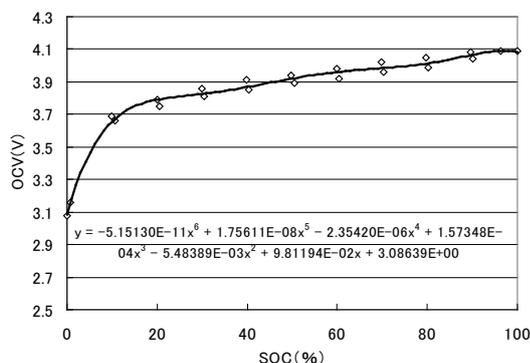


図-4 開回路電圧 (実測値 20°C)

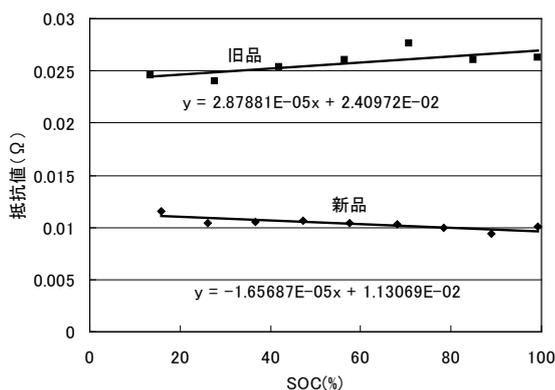


図-5 内部抵抗値 (実測値 20°C)

上記測定結果から

$$F_v(\text{SOC}) = -5.1513 \times 10^{-11} \text{SOC}^6 + 1.75611 \times 10^{-8} \text{SOC}^5 - 2.3542 \times 10^{-6} \text{SOC}^4 + 1.57348 \times 10^{-4} \text{SOC}^3 - 5.48389 \times 10^{-3} \text{SOC}^2 + 9.81194 \times 10^{-2} \text{SOC} + 3.08639$$

$$Fr1(\text{SOC}) = -1.65687 \times 10^{-5} \text{SOC} + 0.013069$$

$$Fr2(\text{SOC}) = 2.87881 \times 10^{-5} \text{SOC} + 0.0240972$$

(1) オイラー法

時間刻み Δt の間電流値は一定値として、電流の積分値である SOC は長方形の面積の和として求める。ここで時間 t の SOC 値は、時間 $t - \Delta t$ の SOC 値に時間 t から $t + \Delta t$ の電流積分値を加えたものであり、時間 t の SOC 値は実際には時間 $t + \Delta t$ 時点の SOC の値を示している。したがって、SOC の関数である開回路電圧および内部抵抗値の時間 t の値は、時間 $(t - \Delta t)$ の SOC 値を使って算出すればよい。上記方程式で時間 t 時の電池電流を求め、さらに電流からその時間の SOC を求める。オイラー法では、時間刻み Δt 内の電流変化を反映していないことになるが、 Δt が十分小さく開回路電圧および内部抵抗値への影響がほとんどなければ大きな誤差は生じない。具体的な計算方法は下記のとおり。

$$R1(i) = Fr1(\text{SOC1}(i-1)) \quad R2(i) = Fr2(\text{SOC2}(i-1))$$

$$V1(i) = F_v(\text{SOC1}(i-1)) \quad V2(i) = F_v(\text{SOC2}(i-1))$$

$$I1(i) = ((V2(i) - V1(i)) + R2(i) * I(i)) / (R1(i) + R2(i))$$

$$I2(i) = ((V1(i) - V2(i)) + R1(i) * I(i)) / (R1(i) + R2(i))$$

$$\text{SOC1}(i) = \text{SOC1}(i-1) + I1(i) * \Delta t / (\text{Ah1} * 36)$$

$$\text{SOC2}(i) = \text{SOC2}(i-1) + I2(i) * \Delta t / (\text{Ah2} * 36)$$

Ah1 : 電池 1 放電容量 (Ah)

Ah2 : 電池 2 放電容量 (Ah)

なお、SOC の初期値を与える必要がある。

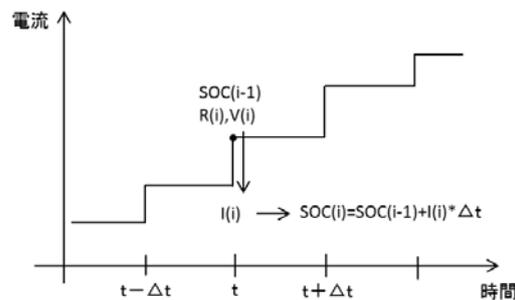


図-6 オイラー法

(2) 改良オイラー法

オイラー法では時間刻み Δt 内の電流値は一定としていたが、オイラー法で計算した時間 $t + \Delta t$ の電流値を使用して、 Δt の間直線的に電流が変化するとして SOC を計算する。電流の積分値である SOC は台形の面積の和として求める。刻み時間 Δt 内の SOC の変化を反映することができ、オイラー法より高い精度が期待できる。時間 t での電流値は、オイラー法と同じく前時間の SOC $(i - 1)$ を使って求める。

$$R1(i) = Fr1(\text{SOC1}(i-1)) \quad R2(i) = Fr2(\text{SOC2}(i-1))$$

$$\begin{aligned}
 V1(i) &= Fv(SOC1(i-1)) & V2(i) &= Fv(SOC2(i-1)) \\
 I1(i) &= ((V2(i) - V1(i)) + R2(i) * I(i)) / (R1(i) + R2(i)) \\
 I2(i) &= ((V1(i) - V2(i)) + R1(i) * I(i)) / (R1(i) + R2(i)) \\
 \text{ここで仮にオイラー法で } t + \Delta t \text{ 後の電流を求める。} \\
 SOC1b(i) &= SOC1(i-1) + I1(i) * \Delta t / (Ah1 * 36) \\
 SOC2b(i) &= SOC2(i-1) + I2(i) * \Delta t / (Ah2 * 36) \\
 R1b(i) &= Fr1(SOC1b(i)) & R2b(i) &= Fr2(SOC2b(i)) \\
 V1b(i) &= Fv(SOC1b(i)) & V2b(i) &= Fv(SOC2b(i)) \\
 I1b(i) &= ((V2b(i) - V1b(i)) + R2b(i) * I(i+1)) \\
 & \quad / (R1b(i) + R2b(i)) \\
 I2b(i) &= ((V1b(i) - V2b(i)) + R1b(i) * I(i+1)) \\
 & \quad / (R1b(i) + R2b(i)) \\
 \text{SOCの値は、時間 } t \text{ の電流値とオイラー法で求めた} \\
 \text{時間 } t + \Delta t \text{ の電流値の平均値で求める。} \\
 SOC1(i) &= SOC1(i-1) + ((I1(i) + I1b(i)) / 2) * \Delta t \\
 & \quad / (Ah1 * 36) \\
 SOC2(i) &= SOC2(i-1) + ((I2(i) + I2b(i)) / 2) * \Delta t \\
 & \quad / (Ah2 * 36)
 \end{aligned}$$

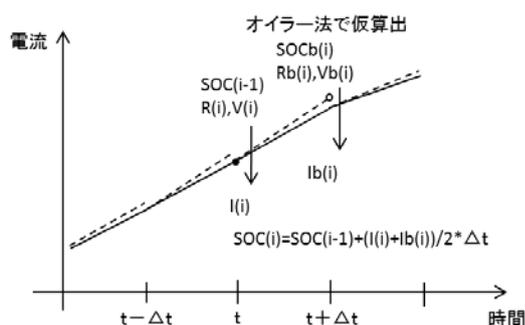


図-7 改良オイラー法

(3) オイラー法と改良オイラー法の比較

オイラー法での計算結果と改良オイラー法での計算結果を比較するため、上記電池1, 2で電池1をSOC 90%、電池2をSOC 50%まで充電し、並列接続した場合のシミュレーション結果を図-8、電池1, 2の初期SOCを50%として充放電した場合のシミュレーション結果を図-9に示す。双方とも時間刻み Δt は1秒とした。オイラー法と改良オイラー法のシミュレーション結果の差の最大値は、図-8の例で電流0.0007A、SOCで0.004%、図-9の例で電流0.0006A、SOCで0.017%とほとんど差がなく、計算の簡単なオイラー法で十分といえ、以下のシミュレーションはすべてオイラー法で行った。

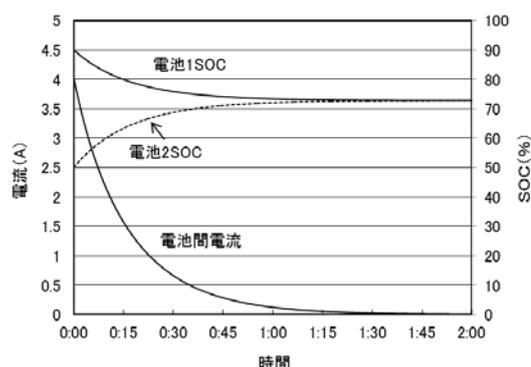


図-8 並列接続シミュレーション結果

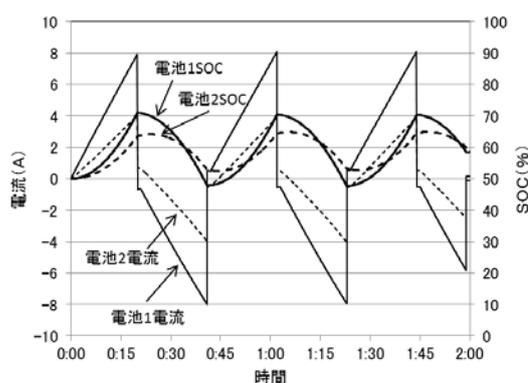


図-9 充放電シミュレーション結果

3.2 新旧電池並列接続実験およびシミュレーション

(1) 実験装置

外観を図-10、実験装置回路図を図-11に示す。実際の回路では電池の接続回路の抵抗値が問題になる。電池を並列接続した際の電池電圧差および電流値から接続回路の抵抗値を求めると0.066 Ω となった。ほぼ対称の回路構成であるので、それぞれの電池に半分の0.033 Ω を割り当てる。等価回路は図-12のとおりとなる。なお、実験は全て周囲温度20 $^{\circ}\text{C}$ で行った。

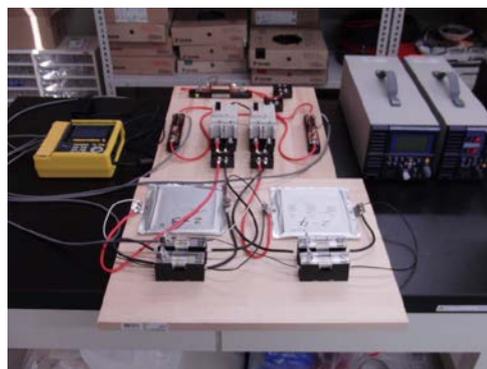


図-10 実験装置外観

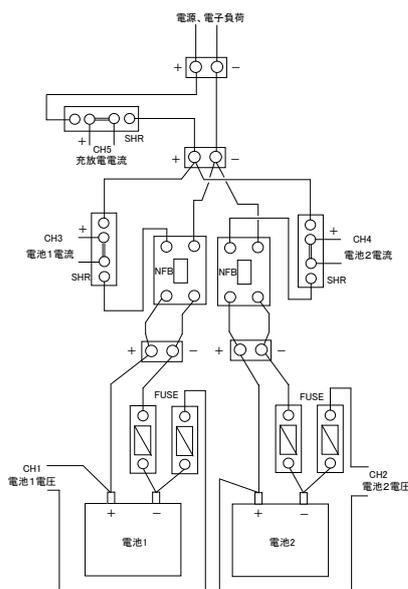


図-1-1 実験装置回路図

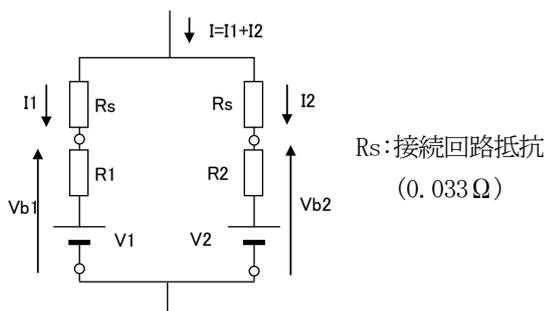


図-1-2 実験回路等価回路

(2) シミュレーション方法

回路方程式は、先の 3.1(1)オイラー法の回路方程式において、内部抵抗値に接続回路抵抗を加えたものになる。すなわち、接続回路抵抗値を R_s とすると、

$$R1(i) = Fr1(SOC1(i-1)) + R_s$$

$$R2(i) = Fr2(SOC2(i-1)) + R_s$$

として、同様に計算すればよい。

(3) 並列接続(外部からの充放電なし)

電池 1、電池 2 の充電状態に差をつけて、並列接続した場合(図-1-3)のシミュレーション結果を図-1-4に、実験結果を図-1-5に示す。シミュレーションの時間刻み Δt は同様に 1 秒とした。

シミュレーション結果と実験結果を比較すると、傾向は似ているものの、大きく次の点が異なっている。

- ・安定する電圧が異なり、実験値のほうが高い。
- ・電流値が異なり、実験値のほうが小さい。

これらの原因として、電池 2 の実際の容量が測定値よ

り小さく、電池 1 から電池 2 への電流積算値が小さくなっていること、これに伴い電池 1 の電圧低下が少なくなっていることが考えられる。電池 2 の容量を仮に小さくして、安定する電圧が実験とほぼ同じになるよう調整したシミュレーション結果を図-1-6に示す。電流の大きさもかなり実験結果に近くなっている。

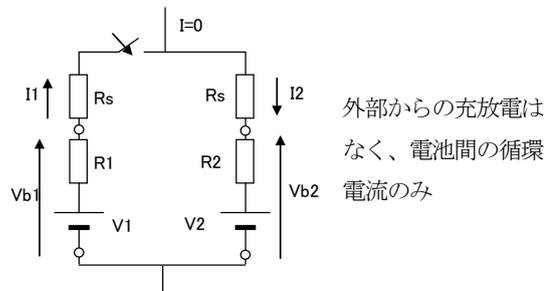


図-1-3 並列接続回路構成

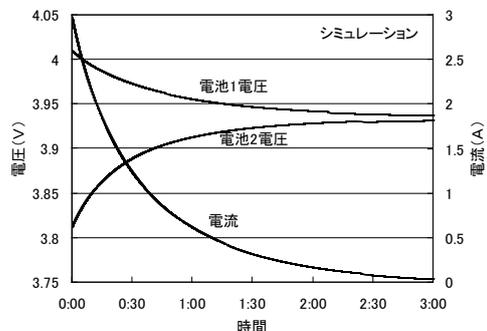


図-1-4 シミュレーション結果

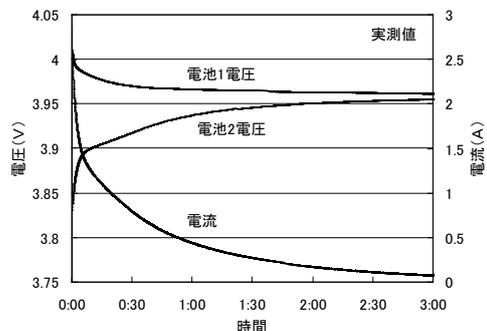


図-1-5 実験結果

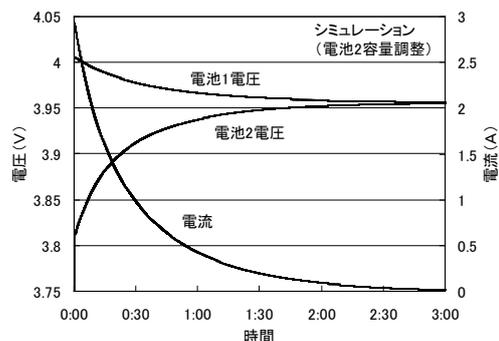


図-1-6 シミュレーション結果 (電池2容量調整後)

(4) 外部充電

電池1、電池2を並列接続した状態（電池電圧は等しくなるよう事前に並列接続して放置）で外部から充電した場合（図-17）のシミュレーション結果を図-18に、実験結果を図-19に示す。

シミュレーション結果と実験結果を比較すると、傾向は似ているものの、大きく次の点が異なっている。

- 電池1と電池2の電流分担が異なり、実験では電池1の電流分担が大きい。
- 充電初期の電池1と電池2の電流分担が変動しているのが、シミュレーションでは再現できていない。

電流分担が異なる理由は、(3) 並列接続と同じく電池2の容量が測定値より小さいことが考えられる。充電初期の差異は、電池内部抵抗値の模擬がうまくできていない影響と予想される。(3) 並列接続と同様に、電池2の容量を仮に小さくしたシミュレーション結果を図-20に示す。電流値がかなり実験値に近づいている。また、充電初期の電流分担の変動が再現できていない件は、低SOC値での内部抵抗値がうまく近似できていないことが原因と考えられる。

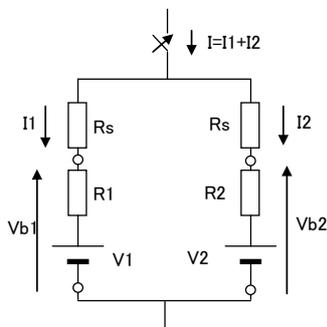


図-17 外部充電回路構成

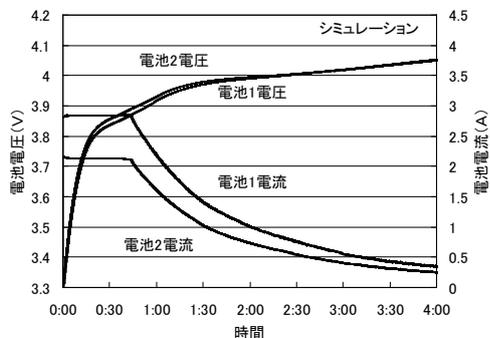


図-18 シミュレーション結果

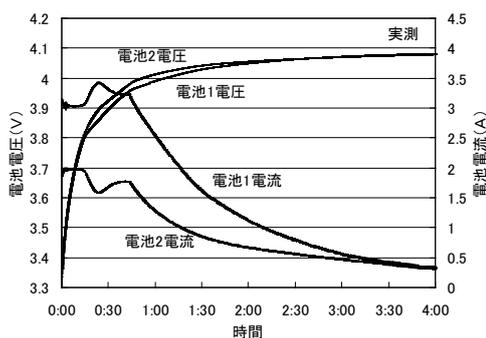


図-19 実験結果

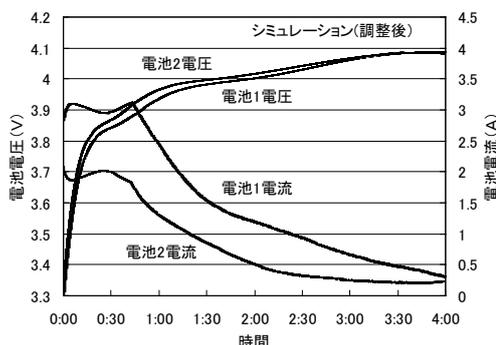


図-20 シミュレーション結果
(電池2容量調整後)

(5) 外部放電

電池1、電池2を並列接続した状態（電池電圧は等しくなるよう事前に並列接続して放置）で外部へ放電した場合（図-21）のシミュレーション結果を図-22に、実験結果を図-23に示す。

シミュレーション結果と実験結果を比較すると、傾向は似ているものの、大きく次の点が異なっている。

- 電池1と電池2の電流分担が異なり、実験では電池1の電流分担が大きい。
- シミュレーションでは放電が終了しておらず、電池電圧が高い。
- 放電末期の電流分担が異なる。

これらの原因もこれまでと同様に電池2の実際の容量が小さいこと、低SOC値での内部抵抗値がうまく近似できていないことが原因と考えられる。これまでと同様に、電池2の容量を仮に小さくしたシミュレーション結果を図-24に示す。電流値がかなり実験値に近づいている。

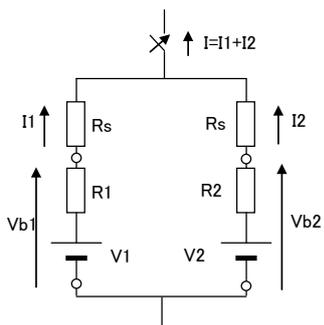


図-21 外部放電回路構成

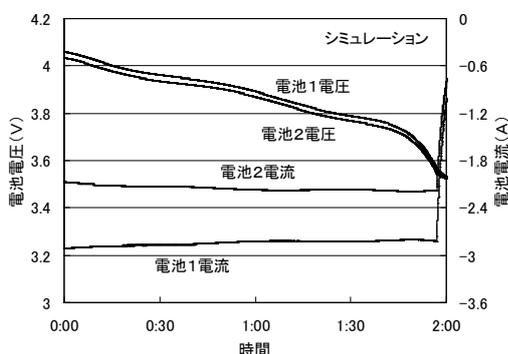


図-22 シミュレーション結果

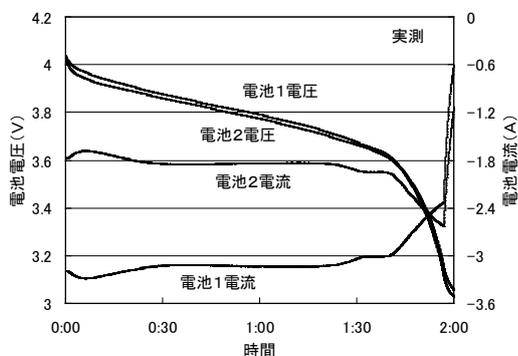


図-23 実験結果

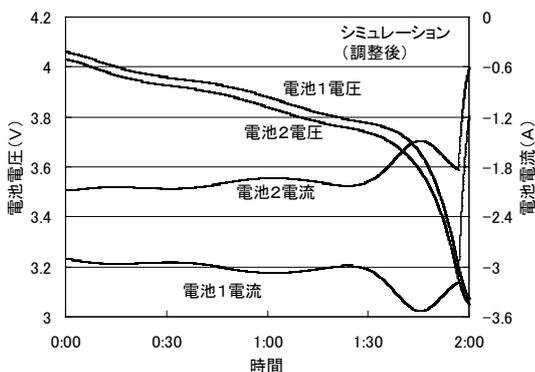


図-24 シミュレーション結果
(電池2容量調整後)

3.3 電池の並列接続に関する考察

上記実験およびシミュレーションから、電池の並列接続に関して下記のことが言える。

- 電池間の電圧が異なる場合、電池間電圧を均等化するよう、電池間に循環電流が流れる。
- 安定後の電池間の充放電電流の分担は、電池間電圧が同じになるよう、容量比で分担される。

安定後の電池間の充放電電流の分担が容量比となる理由は、電池端子電圧（開回路電圧ではない）を同じにするためにはほぼ同じSOCでなくてはならず、ほぼ同じSOC（充放電電流の積算値/電池容量）を維持するには充放電電流の大きさが容量比と同じである必要があるからである。実際の並列接続では、単位容量あたりの内部抵抗値の違いから、内部抵抗値に伴う電圧降下の差を補うような循環電流と容量比で決まる分担電流が重なっていると考えられる。

このような特性を利用すると、並列運転結果から電池間の容量比や単位容量あたり内部抵抗値の比を推定することができる。ちなみに、上記例では充放電電流の比が電池1：電池2=1：0.6程度となっており、電池1の容量を6.38Ahとすると電池2は約3.8Ah（測定値4.82Ah）となり、シミュレーションで調整した値とほぼ同じとなっている。

(1) 外部充放電のない並列接続

外部充放電のない並列接続を想定し、

$$I1 = ((V2 - V1) + R2 * I) / (R1 + R2) \quad \text{①式}$$

$$I2 = ((V1 - V2) + R1 * I) / (R1 + R2) \quad \text{②式}$$

から上記式の意味を考える。電流式の第1項 $(V2 - V1) / (R1 + R2)$ は、電池間の電圧差をなくすように流れる循環電流である。第2項 $R2 * I / (R1 + R2)$ あるいは $R1 * I / (R1 + R2)$ は充放電電流を内部抵抗値に応じて分担している電流である。外部の充放電がなく循環電流のみであることから

$$\int I1(t) dt = - \int I2(t) dt$$

電池1のSOCの変化量

$$\Delta SOC1 = \int I1(t) dt / (Ah1 * 36)$$

電池2のSOCの変化量

$$\Delta SOC2 = \int I2(t) dt / (Ah2 * 36)$$

上記三式から

$$\Delta SOC1 / \Delta SOC2 = - Ah2 / Ah1 \quad \text{③式}$$

③式はSOCの変化量の比が電池容量の逆数の比と等しくなることを示している。また、最終的には電池1と電池2の電圧は同じになることから、電池1と電池

2の最終的なSOCも同じになり、

電池1のSOC初期値 $SOC1_0$

電池2のSOC初期値 $SOC2_0$

$$SOC1_0 + \Delta SOC1 = SOC2_0 + \Delta SOC2 \quad \text{④式}$$

③式④式の連立方程式を解くと

$$\Delta SOC1 = (SOC2_0 - SOC1_0) * Ah2 / (Ah1 + Ah2)$$

$$\Delta SOC2 = (SOC1_0 - SOC2_0) * Ah1 / (Ah1 + Ah2)$$

また、③式を変形して

$$Ah1 / Ah2 = -\Delta SOC2 / \Delta SOC1$$

試しに図-15の実験結果に上記式をあてはめる。電

圧からSOCを推定すると、

$$SOC1_0 = 84\% \quad \Delta SOC1 = -22\%$$

$$SOC2_0 = 16\% \quad \Delta SOC2 = 46\%$$

$$Ah1 / Ah2 = 46 / 22 = 2.09$$

$$Ah2 = 0.48 * Ah1 = 3.1Ah$$

となり、充放電電流から推定された値 3.8Ahより小さい推定値となっている。この原因として電池電圧（開回路電圧ではない）からのSOC値推定の誤差が大きいことが考えられる。

(2) 外部充放電のある並列接続

外部充放電のある並列接続を想定し、①式、②式および安定後の充放電電流が容量比で分担されることから、

$$I1 / I2 = Ah1 / Ah2 \quad \text{⑤式}$$

内部抵抗値を容量あたりの内部コンダクタンスで表現する。

電池1 単位容量あたり内部コンダクタンス $g1$

$$R1 = 1 / (g1 * Ah1)$$

電池2 単位容量あたり内部コンダクタンス $g2$

$$R2 = 1 / (g2 * Ah2)$$

ただし、 $g1$ 、 $g2$ はSOCの関数となる。

①式②式を単位容量あたり内部コンダクタンスで表現すると

$$I1 = (g1 * Ah1 * g2 * Ah2 * (V2 - V1) + g1 * Ah1 * I) / (g1 * Ah1 + g2 * Ah2) \quad \text{⑥式}$$

$$I2 = (g1 * Ah1 * g2 * Ah2 * (V1 - V2) + g2 * Ah2 * I) / (g1 * Ah1 + g2 * Ah2) \quad \text{⑦式}$$

これを⑤式に代入し整理すると

$$V2 - V1 = ((g2 - g1) * I) / (g1 * g2 * (Ah1 + Ah2)) \quad \text{⑧式}$$

すなわち、充放電中は単位容量あたりのコンダクタンス差が大きいほど電池間の開回路電圧差（SOC差）が大きくなる。充電時は単位容量あたりコンダクタンスが大きい（内部抵抗が小さい）ほうが開回路電圧が大きくSOCが高くなり、内部抵抗が小さい電池が

先に充電されることを示している。放電時は単位容量あたりコンダクタンスが大きい（内部抵抗が小さい）ほうが開回路電圧が小さく（SOCが低く）なり、内部抵抗が小さい電池が先に放電されることを示している。また、単位容量あたりのコンダクタンスに差がない場合は、開回路電圧（SOC）は同じとなり、電池間に差異を生ぜず充放電が行えることを示している。このことは、並列接続して充放電を行った場合、単位容量あたりのコンダクタンスに差があると、コンダクタンスが大きいほうの電池が先に充放電上下限に到達してしまい、実質の合成容量は $Ah1 + Ah2$ より小さくなることを示している。

ここで、簡単のために電池特性を線形近似し、上記特性を定量評価する。開回路電圧はSOCの一次関数とする。また、単位容量あたりコンダクタンスは一定値とする。なお、SOC20~90%程度の範囲であれば、このような線形近似でも大きな差異は生じず、実用上は十分といえる。

開回路電圧 $V = a * SOC + b$ とすると

安定後の電池電圧差⑧式は

$$a * (SOC2 - SOC1) = ((g2 - g1) * I) / (g1 * g2 * (Ah1 + Ah2))$$

$$SOC2 - SOC1 = ((g2 - g1) * I) / (a * g1 * g2 * (Ah1 + Ah2)) \quad \text{⑨式}$$

電池間のSOC差は電流レート $I / (Ah1 + Ah2)$ に比例し、開回路電圧のSOCに対する傾き a に反比例し、電池間の単位容量あたりコンダクタンスの差 $g2 - g1$ が大きくなるほど大きくなる。

先の実験例では、

$$Ah1 = 6.38Ah \quad g1 = 15.1S/Ah$$

$$Ah2 = 3.8Ah \quad g2 = 10.2S/Ah$$

$$V = 0.00396 * SOC + 3.71$$

充電電流 10.18A（電流レート 1C）でのSOC差は⑨式より

$$SOC2 - SOC1 = (g2 - g1) / (a * g1 * g2) = -8\%$$

すなわち、SOC90%を充電上限として、電池1がSOC90%到達時（充電完了）に電池2のSOCは82%となる。同様に放電時にも同じSOCの差がつくことから、電池1がSOC20%に到達した時の電池2のSOCは28%となり、電池2は充放電あわせて16%実質の容量が少ないことになる。なお、需要家用蓄電装置など定電流定電圧充電が適用できれば、電池②も90%まで充電可能であり、その場合は放電側の8%だけ実質の容量が少ないことになる。すなわち、定電流充放電とした場合に実質の容量減が大きくなる。

また、 $I=I_1+I_2$ および⑤式より、安定後の電流は

$$I_1=I*Ah_1/(Ah_1+Ah_2) \quad \text{⑩式}$$

$$I_2=I*Ah_2/(Ah_1+Ah_2) \quad \text{⑪式}$$

となる。

一方で充放電の開始時は、充放電電流なしで並列接続され循環電流がなくなっているとすると電池電圧は均等化し、 $V_1=V_2$ となっていると考えられる。すなわち、⑥式および⑦式の V_2-V_1 の項は0 (SOC差なし) であるので、

$$I_1=I*g_1*Ah_1/(g_1*Ah_1+g_2*Ah_2) \quad \text{⑫式}$$

$$I_2=I*g_2*Ah_2/(g_1*Ah_1+g_2*Ah_2) \quad \text{⑬式}$$

⑫式および⑬式は単位容量あたりのコンダクタンスにより過渡的な実効容量が変わるともいえる。仮に、

$$Ah_1=Ah_2 \quad g_1=2*g_2$$

とすると、

$$I_1=0.67I \quad I_2=0.33I$$

となり、単位容量あたりのコンダクタンスが2倍になると、過渡的に電池1の容量が2倍になったのと同じことになる。この場合は時間経過とともに V_2-V_1 (SOC差) が発生し、 $I_1=I_2$ に収束する。このように過渡的に電池間の電流分担が容量比と異なることは、充放電電流が変動した際にも発生し、単位容量あたりのコンダクタンスが大きい電池の過渡的な電流分担が大きくなることに注意が必要である。

電池特性を線形近似し、先の実験例のデータを使い充電電流を 10.18A (電流レート 1C) として⑫⑬式を適用すると、

$$I_1=7.26A \quad I_2=2.92A$$

一方、安定化後の電流は⑩⑪式を適用して、

$$I_1=6.38A \quad I_2=3.8A$$

となる。また、放電時の過渡電流は⑥⑦式を適用し、SOC差が8%あるので

$$V_2-V_1=0.00396*8=0.03168V$$

$$I_1=8.13A \quad I_2=2.05A$$

放電開始時にSOC差があるため、電流差が大きくなっている。

以上の状況をシミュレーションした結果を図-25に示す。上記計算結果とほとんど一致しているが、放電時のSOC差が7%となっており、予想値の8%より少なくなっている。これは電流値が平衡に達する前にSOCが下限値に達したためである。放電時に平衡に達しなかったのは、開始時のSOC差があり、これを解消するだけの時間が足らなかったといえる。また、先の実験で使用した電池の内部抵抗が比較的大きく、

平衡時間が長い(その分過渡的な電流は小さい)ことも影響している。

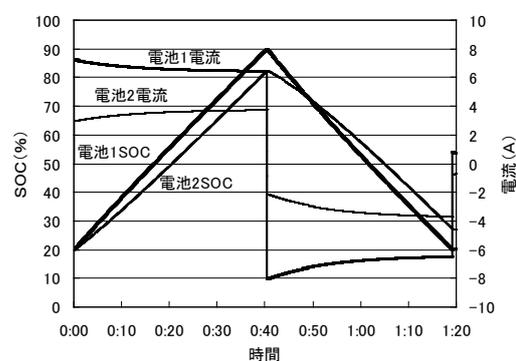


図-25 充放電シミュレーション結果

また、充放電電流が変化した場合、⑧式で求まる平衡状態での電池電圧差 (SOC差) が変化し、充放電電流が大きいほど電池電圧差 (SOC差) が大きくなるため、過渡的な循環電流を生じる。充電時は、単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電圧が高くなっており、充電電流を増やすと単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池に大き目の電流が流れて、電池電圧をさらに高くする方向に動く。充電電流を減らすと単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池に小さ目の電流が流れて、電池電圧を低くする方向に動く。放電時は、単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電圧が低くなっており、放電電流を増やすと単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池に大き目の電流が流れて、電池電圧をさらに低くする方向に動く。放電電流を減らすと単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池に小さ目の電流が流れて、電池電圧を高くする方向に動く。言い方を変えると、単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池が早く応答し、充放電電流が増えた場合は単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電流が先に大きくなり、充放電電流が減った場合は単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電流が先に小さくなる。充放電電流を途中で変化させた場合のシミュレーション結果 (条件は図-25と同じ) を図-26に示す。電流挙動は上記特徴どおりとなっている。

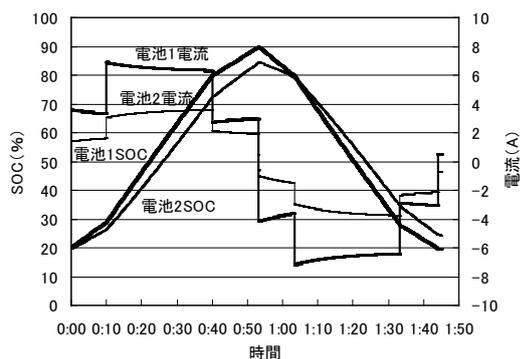


図-26 充放電シミュレーション結果

3.4 まとめ

- 安定状態では、充放電電流は容量比で分担される。
- 外部からの充放電電流がない場合は、電池間の電圧差をなくする方向に電池間の循環電流が流れる。
- 充放電時に単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池と小さい電池の間でSOC差が発生し、コンダクタンスの大きい電池のSOCが充電時には大きく、放電時には小さくなり、差は安定状態になっても解消されない。その結果として単位容量あたりコンダクタンスの小さい電池の実質容量が小さくなる。実質の容量減は充電・放電それぞれで発生するため、特に定電流充放電とした場合に実質容量減が大きく、定電流定電圧充電が採用できる場合（需要家用蓄電装置など）は、容量減は1/2（放電側のみ）となる。
- 充放電電流を増加させると電池開回路電圧差（SOC差）が大きくなる方向に変化し、単位容量あたりのコンダクタンスが大きい電池の過渡的な電流分担が大きくなる。単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池が早く応答し、充放電電流が増えた場合は単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電流が先に大きくなり、充放電電流が減った場合は単位容量あたりコンダクタンスの大きい電池の電流が先に小さくなる。

4. 蓄電装置における蓄電池追加の影響

以上の検討結果を使って、経年により放電容量の減少した蓄電装置（7年経過）に新しい蓄電池を追加した際の影響を検討する。新旧蓄電池を並列接続した際の課題としては下記の2点が考えられる。

- 並列接続した際の合成容量が単純な和より小さくなる。

合成容量 < 新蓄電池容量 + 旧蓄電池容量

⑨式で評価。

- 充放電電流変化時の電流アンバランス

新電池側の電流負担が大きくなる。⑫、⑬式で評価。

以上の2点を評価するためには、蓄電装置構成の想定と7年後の内部抵抗値がどうなっているかのデータが必要である。以前行った単セルの加速劣化試験¹⁾データから推定する。

4.1 合成容量

(1) 蓄電装置の想定

市販品のモジュールをイメージし、それを組み合わせて蓄電装置を構成する。モジュール仕様は下記のとおり。

単セル 2.3V20Ah

モジュール 単セル12直列2並列 27.6V40Ah

想定する蓄電装置は、このモジュールを20直列10並列で構成する。

蓄電装置仕様 552V400Ah220.8kWh

一方、蓄電装置に要求される必要容量は320Ahとする。

蓄電装置の電圧特性（直線近似 SOC 20~80%）

$$OCV=1.095 \cdot SOC[\%]+490.7 \text{ [V]}$$

モジュール1個あたり抵抗値 0.0235 Ω (25°C新品時)

ただし、単セルでは1個 0.00124 Ω

12直列2並列では 0.00744 Ω

0.0235-0.00744=0.0161 Ω は接続抵抗と考えられる。

蓄電装置の内部抵抗値は、モジュール20直列10並列なので、

$$0.0235 \cdot 20 / 10 = 0.047 \text{ Ω}$$

単容量あたりのコンダクタンスは

$$(1/0.047) / 400 = 0.0532 \text{ S/Ah}$$

(2) 7年後の容量および内部抵抗値

単セル加速劣化試験の実績では、放電容量15%減で内部抵抗値は約2倍と予想される。

7年後の容量は

$$400 \cdot 0.85 = 340 \text{ Ah}$$

単セル抵抗値は

$$0.00124 \cdot 2 = 0.00248 \text{ Ω}$$

モジュール1個あたり抵抗値は、接続抵抗を考慮して

$$0.00248 \cdot 12 / 2 + 0.0161 = 0.031 \text{ Ω}$$

モジュール20直列10並列時の内部抵抗値は

$$0.031 \cdot 20 / 10 = 0.062 \text{ Ω}$$

単容量あたりのコンダクタンスは

$$(1/0.062) / 340 = 0.0474 \text{ S/Ah}$$

(3) 追加蓄電池の容量

追加蓄電池の容量は 2. (2) により初期値の 21% であるので 80Ah 必要であり、モジュール 20 直列 2 並列となる。

追加蓄電池の内部抵抗値は

$$0.0235 \times 20 / 2 = 0.235 \quad \Omega$$

単位容量あたりコンダクタンスは

$$(1 / 0.235) / 80 = 0.0532 \text{ S/Ah}$$

(4) 合成容量

並列接続により単位容量あたりコンダクタンスの小さな蓄電池の容量が見かけ上小さくなることを考慮する。⑨式を適用する。

$$\text{SOC2} - \text{SOC1} = ((g2 - g1) * I) / (a * g1 * g2 * (\text{Ah1} + \text{Ah2})) \quad \text{⑨式}$$

これに上記値をあてはめる。また、電流値は 160A (電流レート 0.5C) とする。

$$g1 = 0.0474 \quad g2 = 0.0532 \quad a = 1.095 \quad \text{Ah1} = 340 \quad \text{Ah2} = 80$$

$$\begin{aligned} \text{SOC2} - \text{SOC1} &= ((0.0532 - 0.0474) * 160) / (1.095 * 0.0474 * 0.0532 * (340 + 80)) \\ &= 0.8 \% \end{aligned}$$

充電と放電で 0.8 * 2 = 1.6% の SOC 差が発生する。

すなわち旧品蓄電池の見かけ上の容量は

$$340 * (1 - 0.016) = 335 \text{ Ah}$$

合成容量は

$$335 + 80 = 415 \text{ Ah} \quad (\text{単純合計より } 5\text{Ah 減少})$$

元々 5% の裕度を見ており、裕度内であり追加蓄電池容量を大きくする必要はない。

4.2 充放電流変化時のアンバランス

並列接続による過渡的な充放電電流のアンバランスは、⑫式⑬式を適用する。電流値は同様に 160A (電流レート 0.5C) とする。

$$I1 = I * g1 * \text{Ah1} / (g1 * \text{Ah1} + g2 * \text{Ah2}) \quad \text{⑫式}$$

$$I2 = I * g2 * \text{Ah2} / (g1 * \text{Ah1} + g2 * \text{Ah2}) \quad \text{⑬式}$$

$$\begin{aligned} I1 &= 160 * 0.0474 * 340 / (0.0474 * 340 + 0.0532 * 80) \\ &= 126.6 \text{ A} \quad (\text{電流レート } 0.372\text{C}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I2 &= 160 * 0.0532 * 80 / (0.0474 * 340 + 0.0532 * 80) \\ &= 33.4 \text{ A} \quad (\text{電流レート } 0.417\text{C}) \end{aligned}$$

電流レートでは 0.045C 約 11% 程度の差が発生しているが、特に問題になる値ではない。

4.3 シミュレーション結果

以上のとおり合成容量の低減および電流アンバランスとも発生するが制約になる値ではなく、新旧蓄電池の並列接続は可能で、経済性評価にも影響はないと考えられる。確認のため、シミュレーションで新旧蓄電池

の並列接続時の充放電を評価した。回路構成を図-27に、シミュレーション結果を図-28に示す。シミュレーションでも上記評価結果が妥当であることが示された。なお、単電池と比べて組電池では SOC 差が小さくなっているが、組電池では単電池直列数が多く内部抵抗値が大きくなること、開回路電圧の傾きが大きくなることがその理由と考えられる。

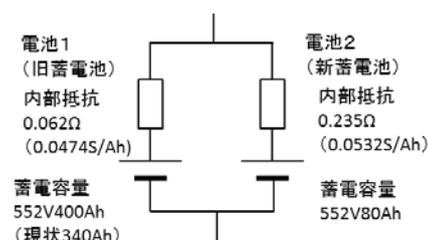


図-27 新旧蓄電池並列接続回路構成

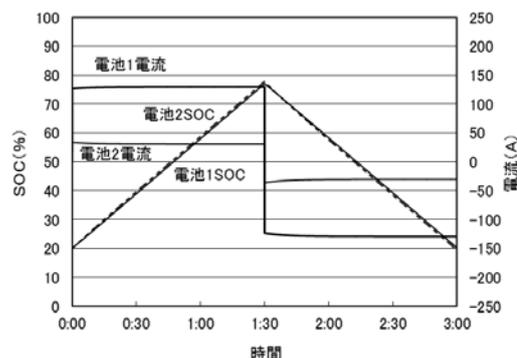


図-28 新旧蓄電池並列接続シミュレーション結果

5. 蓄電池の直列接続

直列接続時の等価回路を図-29に示す。直列接続時は同じ電流で蓄電池が充放電されることから、容量の小さな蓄電池の充放電が終了すると容量の大きな蓄電池も充放電を終了する必要があり、容量の小さな蓄電池の容量が組電池の容量となる。

直列接続時に注意すべきは、単純に各電池の充電終了電圧あるいは放電完了電圧の和で組電池の充放電完了を管理すると、容量の小さな蓄電池が過充電あるいは過放電を起こし、電池が破壊されることである。これを防止するため、蓄電池の直列接続時には各単電池の電圧確認および電圧異常時の全体停止が必要であり、CMS (セルマネジメントシステム) といわれる装置で監視制御が行われる。

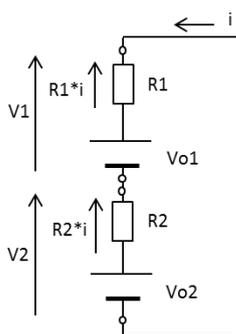


図-29 直列接続回路構成

蓄電池の直列接続で運用上の大きな制約になる課題として、同じ電流で充放電しているのに各蓄電池のSOCに徐々に差が発生することがある。各蓄電池のSOCに差が発生すると、特定電池が早めに充放電を完了する(SOCが大きい電池が早めに充電完了となり、SOCが小さい電池が早めに放電完了となる)ことになり、組電池として充放電が十分に行えなくなる(組電池の見た目の容量が小さくなる)。これを是正するために、組電池においては各蓄電池のSOCを合わせ均等化処理が必要である。

同じ電流で充放電しているのに各蓄電池のSOCに差が発生する原因として、各蓄電池のクーロン効率(Ah効率：放電Ah/充電Ah)の差異が考えられる。リチウムイオン電池のクーロン効率はほぼ100%であり、クーロン効率がどちらも100%の容量の異なる蓄電池を直列接続し充放電を繰り返した場合のシミュレーション結果を図-30、容量の小さな蓄電池(電池2:放電容量電池1の1/2)のクーロン効率を99%(電池1は100%)とし充放電を繰り返した場合のシミュレーション結果を図-31に示す。クーロン効率が同じであると充放電を繰り返してもそれぞれの電池のSOCに変化はないが、クーロン効率が異なるとクーロン効率の高い蓄電池のSOCが高くなる(クーロン効率の低い蓄電池のSOCが低くなる)。実際の蓄電池ではクーロン効率の差異はごくわずかと考えられるが、わずかでも差があるといずれはSOCに差異を生ずるようになる。

ちなみにSOCを合わせ均等化処理は、電圧の低い(SOCの低い)単電池のみを充電するか、電圧の高い(SOCの高い)単電池のみを放電する(抵抗で熱にする)かで実施できる。放電するほうが簡単であるが放電ロスを生じる。一般的には放電処理が多いようである。

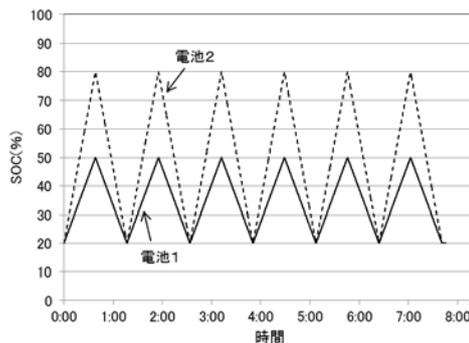


図-30 直列接続時のSOC (クーロン効率差異なし)

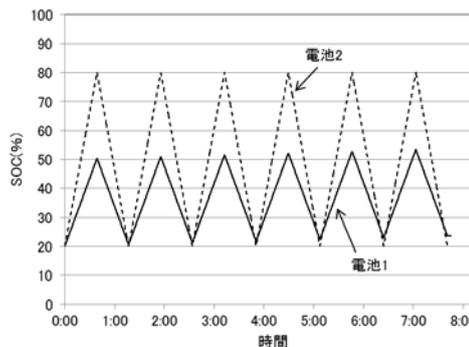


図-31 直列接続時のSOC (クーロン効率差異あり)

6. 蓄電池の直並列接続

6.1 充放電シミュレーション

実際の蓄電池においては単電池を直並列して使用される。直並列接続においては直列接続の制約と並列接続の制約を同時に受ける。直並列接続時の等価回路を図-32に示す。

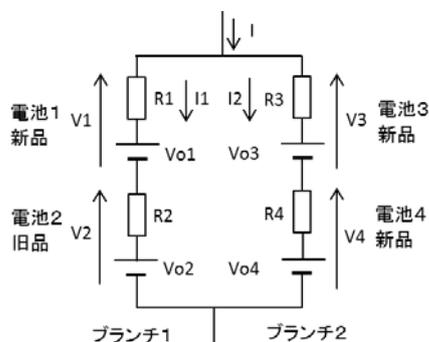


図-32 直並列接続回路構成

図-32の回路構成における回路方程式は下記のとおりとなる。

$$I1+I2=I$$

$$R1*I1+Vo1+R2*I1+Vo2=R3*I2+Vo3+R4*I2+Vo4$$

以上より

$$I1=(R3+R4)*I-Vo1-Vo2+Vo3+Vo4/(R1+R2+R3+R4)$$

$$I2=(R1+R2)*I+Vo1+Vo2-Vo3-Vo4/(R1+R2+R3+R4)$$

新旧蓄電池の並列接続のシミュレーションに使った新旧電池のデータを使い、NO1, 3, 4電池は新品、NO2電池は旧品とした場合のシミュレーション結果を図-33, 34に示す。SOCの範囲は20~80%とした。ブランチ1の内部抵抗値が大きいことから電流分担はブランチ2のほうが大きく、ブランチ2の電池3, 4は電池1よりも充電は行われている(電池1のSOC50%に対し電池3, 4のSOCは64%)が、電池2の充電終了(SOC80%)に伴い十分な充電が行われていない。このように、性能の悪い電池は直列接続している他の電池だけでなく、並列接続している電池にも悪影響を与える。

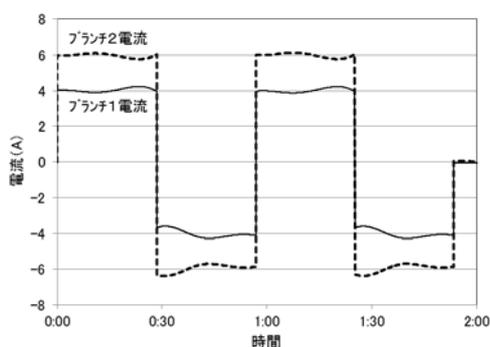


図-33 充放電電流

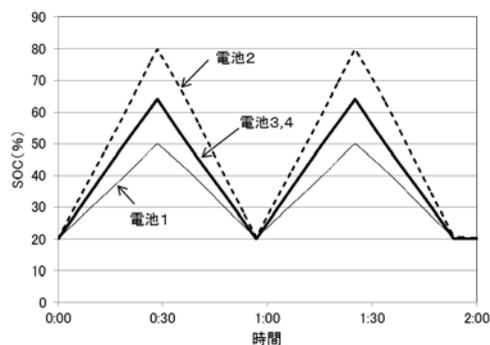


図-34 各電池SOC

経年により一部の単電池の性能が落ちることが予想される。その場合は性能の落ちた単電池を同仕様の新

品に取り換えれば新品電池の利用率は旧品電池に足を引っ張られて低くなるが、比較的性能を維持している旧品電池の利用率が高くなり、組電池としての性能は向上する。組電池の性能が落ちてきた場合に、全体として性能が落ちているのか、一部の単電池の性能が落ちて全体として落ちているのを見極める必要があり、そのためには充放電時の単電池間の電圧アンバランスの状況を確認する必要がある。SOC幅を大きくして充放電を行い各単電池の電圧振れ幅を観察し、電圧振れ幅の大きな電池が性能が落ちている単電池である。

6.2 充放電制御装置

並列接続しているブランチ2の電池3, 4は、電池2のつながったブランチ1を切り離せば、制限いっぱいまで充電可能である。一方で、ブランチ2の充電が多くなり電圧がブランチ1より高くなるため、ブランチ2充電後にブランチ1を単純に並列接続するとブランチ2からブランチ1に循環電流が流れ、電池2は過充電となる。

蓄電池の利用率を向上し、循環電流を遮断する装置として、図-35の双方向スイッチからなる充放電制御装置が考えられる²⁾。蓄電装置を構成する蓄電池の直列部分(ブランチ)毎に設置することを基本とするが、新旧蓄電装置を並列接続する場合は、新品蓄電装置あるいは旧品蓄電装置単位に設置することでも良い。蓄電装置として充電あるいは放電であることを指定すると、蓄電装置を構成する各単電池には充電あるいは放電の一方しか電流が流れないため、循環電流を防止できる。また、ブランチ中の蓄電池の電圧が規定値から外れればスイッチを開放し充放電を停止する。

図-32の各ブランチに充放電制御装置を設置した場合のシミュレーション結果を図-36, 37に示す。ブランチ1が充電完了後もブランチ2は充電を続け、放電時はまずブランチ2のみ放電しブランチ2の電圧が下がってから両ブランチが放電している。これにより電池3, 4のSOC範囲は20~64から20~80へと大幅に改善しており、組電池としての容量が大幅に増えている。なお、ブランチ1の直列接続された電池1に関しては救済方法がない。この方法では、ブランチ1を開放後全充放電電流をブランチ2が分担するする必要があり、電池3, 4がその電流に耐えられる必要があるが、充放電電流が非常に大きい場合を除いて通常は問題ない。

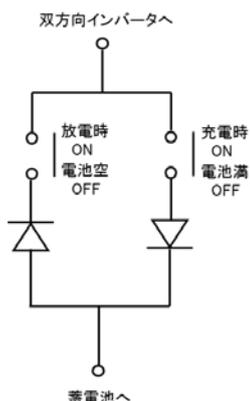


図-35 充放電制御装置

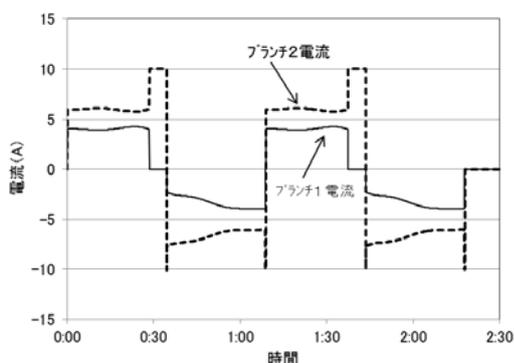


図-36 充放電電流シミュレーション結果

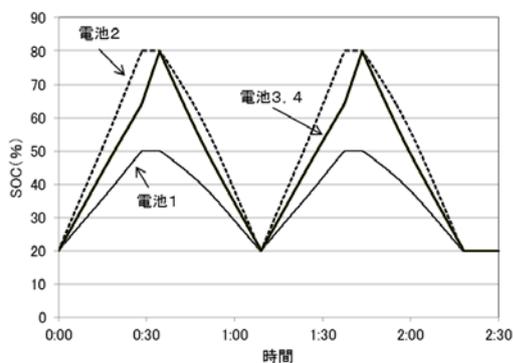


図-37 SOCシミュレーション結果

6.3 まとめ

- ・蓄電池の直並列接続においては、最も特性の悪い蓄電池に他の蓄電池も充放電を合わされるため十分な充放電が行えなくなり、組電池としての放電容量が極めて小さくなる。組電池においては構成する単電池特性を極力合わす必要がある。
- ・充放電を繰り返すうちに各単電池のSOCに差を生じ、組電池の見た目の容量が小さくなるため、各単電池のSOCを合わす均等化処理が必要である。
- ・経年により一部の単電池の性能が落ちた場合は、性

能の落ちた単電池を同仕様の新品に取り換えることで比較的性能を維持している旧品電池の利用率が高くなり、組電池としての性能は向上する。

・組電池の性能が落ちてきた場合に、全体として性能が落ちているのか、一部の単電池の性能が落ちて全体として落ちているように見えているのかを見極める必要がある。SOC幅を大きくして充放電を行い各単電池の電圧振れ幅を観察し、電圧振れ幅の大きな電池が性能が落ちている単電池である。

7. むすび

本報告で取り上げた組電池の特性は、運用上は重要であると考えられるが、文献等が見あたらないため、今回さまざまな検討を行った。さまざまな特性や注意すべき項目はかなり明らかにできたと思う。また、本報告においては、直並列数は2並列2直列までとしたが、回路方程式は同様であり容易に多数の直並列に拡張できる。また、その特性に関しては基本的に2並列2直列と同じである。

本報告では多数のシミュレーション結果を提示したが、この前提となる電池特性の把握が非常に重要である。基本的な電池特性の把握には長期間にわたる地道な実験が必要であり、それを抜きにしてこのような検討は行えないことをあえて申し添える。

[謝辞]

本研究は、四国電力株式会社経営企画部より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 四国電力株式会社研究期報 N0100
「リチウムイオン電池特性試験結果について」
2013年6月
- 2) 公開特許公報 特開 2014-54072
「蓄電装置」 2014年3月20日