

蓄電池の新たな状態表示・監視方法の提案

(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
蓄電量
SOC
放電容量

Key Words : Battery
Lithium Ion Battery
Quantity of charge
SOC(State Of Charge)
Service capacity

Proposal for the new method for indicating the status of batteries

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

Yasunobu Tada

Abstract

The most important items of controlling batteries are the service capacity and the quantity of charge. We propose the new method for the estimating the service capacity using operating data without charge-discharge tests.

Generally we use SOC (State Of Charge : the quantity of charge / the service capacity) for indicating the quantity of charge. We propose the new method for improving the accuracy of SOC.

SOC is based on integrating current (Ah), the new SOC based on integrating power (Wh) is more convenient to control batteries. Estimating the loss of batteries, the new SOC based on Wh is practical.

1. はじめに

蓄電池の運用において、蓄電池の放電容量および現時点での蓄電量の把握が最も重要である。放電容量は蓄電池温度で変化するため、蓄電池温度の影響を考慮する必要がある。また、蓄電量の状態表示には、電流積算値 (A h) ではなく電流積算値を放電容量で除した SOC (State of Charge %) が一般的に使われる。これは、蓄電池の開回路電圧 (OCV Open Circuit Voltage) から SOC 値を推定でき、電流積算で発生する積算誤差の累積を補正して、電流積算よりも正確に蓄電量を推定できるからである。ただし、SOC は基準となる放電容量の決め方が明確でなく、通常は放電容量を定格放電容量 (公称放電容量) とするために、電流積算値を定格放電容量で除した SOC 値と開回路電圧から推定した SOC 値が一致しないことが多い。

このように、現状の放電容量や蓄電量の状態表示方法の精度は十分とは言えず、精度の良い新たな状態表示方法が望まれている。また、放電容量を把握するためには、蓄電池の通常運用を取りやめて容量試験 (満充電後完全放電まで放電して放電電流積算値を測定) を行う必要があり、頻繁に行うことはできないことから、運用中に蓄電池容量を把握できる新たな方法も必要性が高い。

さらに、大型蓄電装置においては充放電の大きさは双方向インバータの出力で指定されるため、電流 (A) でなく電力 (kW) で指定することが一般的である。蓄電池充放電量を電力で指定する場合は、蓄電量を電力量 (kWh) で表示したほうが運用上便利である。ところが、蓄電池に損失があるために蓄電量の大きさを単純な充放電電力積算値 (kWh) で表すことはできない。蓄電量を電力量で表示する新たな方法も望まれる。

以上を踏まえ、下記の蓄電池の新たな状態表示・監視方法を検討した。

- ①電流積算値から求めた SOC 値と開回路電圧から推定した SOC 値が一致する SOC 値の算出方法
- ②運用中データから放電容量を推定する方法
- ③蓄電量を kWh で表示する方法

2. SOC の算出方法

2.1 高温時の放電容量を基準とした SOC

蓄電池の蓄電管理に充放電電流積算値や SOC (充放電電流積算値 / 放電容量 [%]) が使われるのは、蓄電池のクーロン効率 (A h 効率) がほぼ 100% で損

失がなく、充放電電流積算値の差が蓄電量 (A h) の差になるからである。単純な充放電電流の積算では長時間にわたり積算すると積算誤差が大きくなり、蓄電量に誤差を生じるようになる。この補正方法として、一旦蓄電池を満充電まで充電してその状態を SOC 100% としたり、一旦蓄電池を完全放電してその状態を SOC 0% とする方法がある。ただし、通常の蓄電池では寿命消費を減らすために、満充電まで充電したり完全放電することはないため、この方法は頻繁に使えない。もう一つの補正方法として、蓄電池の開回路電圧と SOC 値の間に 1:1 の関係があることを利用する方法がある。開回路電圧測定には 1~2 時間以上の充放電停止が必要であるが、通常の運用中に放電量の補正を行うことができるため、通常この方法が採用されている。

SOC 値の算出にあたっては、算出式に放電容量が含まれており、放電容量は周囲温度で大きく変化し (図-1)、経年でも変化するため、基準となる放電容量はいくらかという課題がある。その時点の放電容量が正確にわかればそれを使えるが、通常はわからないため割り切って定格放電容量を使っていることが多い。また、蓄電池の開回路電圧 (OCV) と SOC 値の間に 1:1 の関係があるといわれるが、その場合の SOC 値の基準となる放電容量はどう決めるかは不明である。

そこで、リチウムイオン電池単セル (20 A h) を使って周囲温度を変えて SOC と開回路電圧の関係を調査した (図-2)。この場合の SOC は、その時点のその周囲温度で測定した放電容量 (温度によって変わる) を用いて算出している。図-2 を見ると開回路電圧と SOC 値の間に 1:1 の関係がなく、周囲温度が下がると電圧変化が小さくなっているように見える。また、温度が低い場合の電圧パターンは、周囲温度が高い場合の電圧パターンの一部分のように見え、SOC 60% 付近の小さい山は温度が下がるにつれて左に移動しているように見える。

そこで、周囲温度が低下すると運用できる SOC 範囲が狭まるという考え方で、周囲温度が最も高い場合 (今回は 40°C) の放電容量を基準とした SOC (40°C 基準の SOC ということで SOC_{40} と表記する) をすべての温度で適用することとし、40°C での開回路電圧と SOC_{40} の関係を使って 40°C より低い温度での開回路電圧から SOC_{40} を求めた結果を図-3 に示す。図-3 で求められる放電容量推定値と図-1 の放電容量の実測値を表-1 に示す。開回路電圧値から推定さ

れる放電容量と実測の放電容量はかなり近い値となっており、周囲温度が低下すると運用できるSOC範囲が狭まるという考え方や、周囲温度が最も高い(40℃)場合の放電容量を基準としたSOC₄₀を蓄電量の管理指標とすることは妥当であると考えられる。SOC₄₀を使った温度低下による運用可能範囲の変化を図-4に示す。温度低下により特に低SOC領域において運用範囲が狭まっていることがわかる。

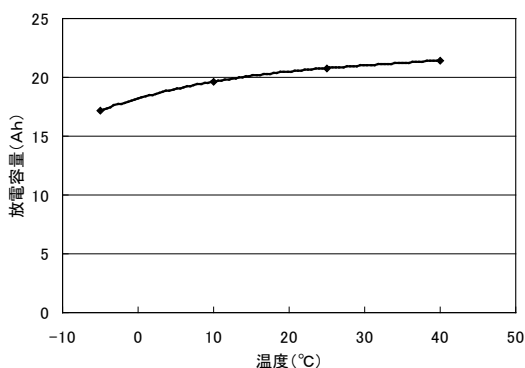


図-1 温度と放電容量の関係
(20A h 単セル 0.2C 放電)

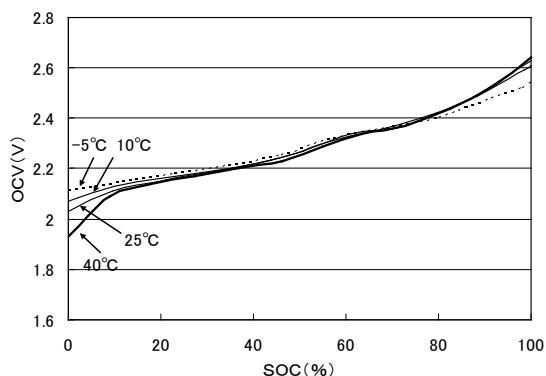


図-2 SOCとOCVの関係
(20A h 単セル)

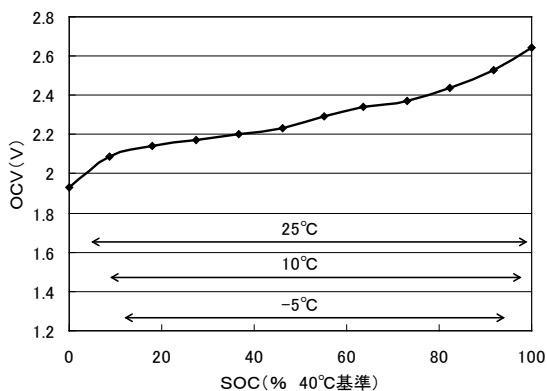


図-3 各温度でのOCVと対応するSOC₄₀の値

表-1 OCVによる推定放電容量と実測値

温度(℃)	推定容量(Ah)	実測容量(Ah)	差異
-5	17.5	17.1	0.4
10	19.3	19.61	-0.31
25	20.3	20.8	-0.5
40	—	21.45	—

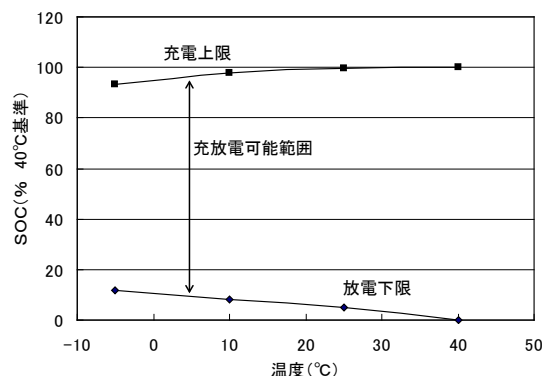


図-4 温度と充放電可能範囲の関係
(20A h 単セル 0.2C)

2.2 高温時の放電容量を基準としたSOC(SOC₄₀)の妥当性の確認

周囲温度が最も高い(40℃)場合の放電容量を基準としたSOC₄₀を蓄電量の管理指標とすることが妥当であることをさらに確認するために、運用中に周囲温度変化があった場合でも蓄電池の蓄電量を的確に表現できるか実験で確かめた。

(1) 実験内容

電池運用中に周囲温度を変えて充放電を行った。実験は下記3ケース行った。

- ① 充電時・放電時の温度変化 -5℃で充電、40℃で放電 (0.5C C C C V 充電 0.2C 放電)
- ② 充電時・放電時の温度変化 40℃で充電、-5℃で放電 (同上)
- ③ 充電中・放電中の温度変化 充放電時 25℃→-5℃→40℃→10℃→25℃

(0.2C C C 充放電 温度を静定させながらの実験で充放電は1時間単位で間隔をあけて実施)

上記パターンの動きを図-4にあてはめた結果を図-5に示す。②のように高温で充電して低温に持ってくるとその温度では充電できない領域の充電量となるが、開回路電圧が制限値を超えるわけではないので問題ない。

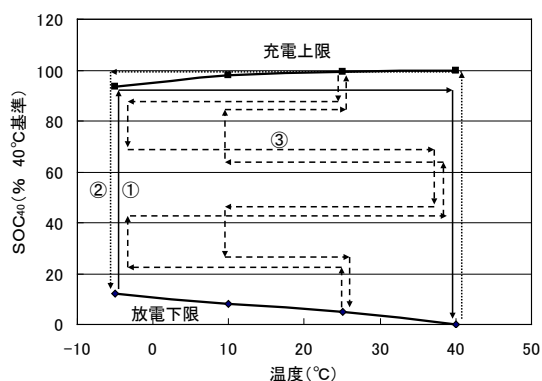


図-5 実験パターン

(2) 実験結果

上記3ケースの放電容量実測値および図-4から予想される放電容量を表-2に示す。実測値と予想値は①②ではよく一致している。③では予想値よりも実際の充放電容量が大きくなっている。そこで、充放電を連続的に行いながら温度を変化させる実験を④として行った。電池温度の変化を図-6に示す。周囲温度変化は図-3とは異なり、また完全に目標温度には到達していない。また、放電容量実測値を表-2に追記する。④の放電容量(20.81Ah)は③の放電容量(20.9Ah)とほとんど同じであり、測定には問題はないと考えられる。予想値のほうに問題があると考えられ、25°Cでの0.2C CC充放電結果(表-3)を見ると、20.8Ahであり③④の実測値と一致している。また、表-2でもこの条件での予想精度が低いことがわかる。ちなみに試験③④の放電時OCVは2.028V、充電時OCVは2.635Vであった。OCVからSOC₄₀を推定すると、放電時は3.2%、充電時は99.1%、その差は95.9%で放電容量では20.6Ahとなり、ほぼ実測値に近い値が得られた。このように、開回路電圧を併用することで、電池の状態の推定精度を向上できると考えられる。

以上の結果から、SOC₄₀で電池状態が表現でき、充放電中に周囲温度が変化しても、充放電可能なSOC₄₀の範囲が周囲温度で変化するという考え方で問題ないと考えられる。また、充放電途中での温度変化や連続・間欠充放電など充放電の経歴に影響を受けないことも確認できた。

表-2 充放電Ah実測値・予想値

実験NO	充放電	温度(°C)	実測値		予想値			
			Ah	SOC変化(%)	開始SOC(%)	終了SOC(%)	SOC変化(%)	Ah
①	充電	-5°C	17.41	81.2	12	93.5	81.5	17.48
	放電	40°C	20.01	93.3	93.5	0	93.5	20.06
②	充電	40°C	21.55	100.5	0	100	100	21.45
	放電	-5°C	18.94	88.3	100	12	88	18.88
③	充電	25°C	20.94	97.6	5	99.5	94.5	20.27
	放電	25°C	20.9	97.4	99.5	5	94.5	20.27
④	充電	25°C	20.91	97.5	5	99.5	94.5	20.27
	放電	25°C	20.81	97	99.5	5	94.5	20.27

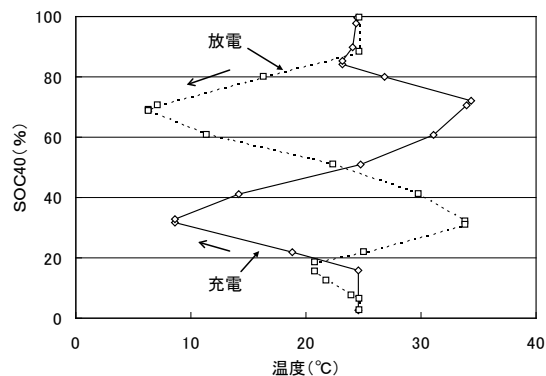


図-6 実験④実験パターン

表-3 充放電結果 (0.2C)

温度	OCV		SOC40		推定容量 (Ah)	実測容量 (Ah)
	放電時	充電時	放電時	充電時		
△5°C	2.102	2.493	11.6	88.1	16.41	16.07
10°C	2.064	2.586	5.8	96.9	19.54	19.34
25°C	2.01	2.62	2.6	98.6	20.59	20.8
40°C	1.91	2.643	0.5	99.3	21.19	21.46

2.3 高温時の放電容量を基準としたSOCの課題

上記のとおり、蓄電池の高温時の放電容量を基準としたSOCを蓄電池蓄電管理の指標とすることで、温度変化に関係なくその時点の蓄電量の状態を一元的に表示でき、開回路電圧とSOCとの関係も温度に影響を受けないため、非常に便利である。一方でこの手法の課題は下記のとおりである。

- ・SOC算出の基準となる放電容量の測定あるいは開回路電圧とSOCとの関係を使った推定は、従来どおり必要であり、経年による放電容量の減少を考慮する必要がある。

- ・蓄電装置の高温状態での放電容量や開回路電圧とSOCとの関係をどうやって測定するかが大きな課題である。放電容量は夏期であれば高温状態で測定可能であり、開回路電圧とSOCとの関係を使った推定(3章)も可能であるが、開回路電圧とSOCとの関係に関しては測定に長時間必要で実装置での試験は困難なため、恒温槽に入る小型の蓄電モジュール等での試験が必要である。

3. 運用中データから放電容量を推定する方法

周囲温度が最も高い（40℃）場合の放電容量を基準としたSOC₄₀を蓄電量の管理指標とすることが妥当であることは確認できたが、実際の放電可能量の推定や充放電電流積算値からSOC₄₀を算出するには40℃での放電容量が必要であり、40℃での放電容量をどうやって測定（あるいは推定）するかという課題が残るため、その方法を検討した。

3.1 放電容量推定方法

周囲温度が最も高い（40℃）場合の放電容量を基準としたSOC₄₀を充放電電流積算値から計算するには、下記式を使用する。

$$\Delta \text{SOC}_{40} [\%] = \int \text{充放電電流} [\text{A}] dt \div 40^\circ\text{C蓄電池放電容量} [\text{Ah}] \times 100 \quad \text{①式}$$

40℃での全放電をSOC0%、40℃での満充電をSOC100%としている。この考え方に基けば温度変化に対してSOC₄₀は変動せず、また、安定後の開回路電圧とSOC₄₀間には1:1の関係があることから、開回路電圧からSOC₄₀を推定することが可能である。

①式を変形して、

$$40^\circ\text{C蓄電池放電容量} [\text{Ah}] = \int \text{充放電電流} [\text{A}] dt \div \Delta \text{SOC}_{40} \times 100 \quad \text{②式}$$

蓄電池放電容量を推定するためには、SOCが低い場合と高い場合の2点の開回路電圧とその間の電流積算値を測定し、SOC差の ΔSOC_{40} は2点の開回路電圧とSOC₄₀-OCVの関係（図-3）を使って求める。2点の時間間隔は充放電電流積算値の誤差が蓄積しない程度に短いほうがよい。

ここで、開回路電圧測定にどの程度充放電を停止する必要があるか調査した。リチウムイオン電池の組電池（定格電圧55V）を使って充放電停止後の開回路電圧を測定した（図-7）。電圧が安定するまでの時間は放電時で1時間以上、充電時は3時間以上となっており、最低でも1時間以上の充放電停止時間が必要である。1日のSOCが高くなる時間帯および低くなる時間帯に1時間程度の充放電停止が行えると好都合である。何回か測定を行って現時点の蓄電池容量を推定することになる。

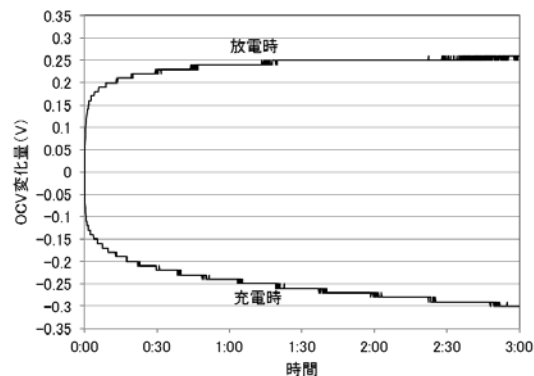


図-7 充放電終了後の開回路電圧変化

3.2 放電容量推定実験

実際の組電池（40Ah、2.2kWh）を使って、蓄電池容量の推定実験を行った。推定の基になる開回路電圧とSOCとの関係を図-8、実験の充放電電流パターンを図-9、電流積算値・開回路電圧・蓄電池容量推定値などを表-4に示す。同時に行った容量測定結果は40.7Ahであった。測定値に比べて推定値が若干小さいもののほぼ同じ値となっている。この推定方法により蓄電池容量の推定は可能と考えられる。

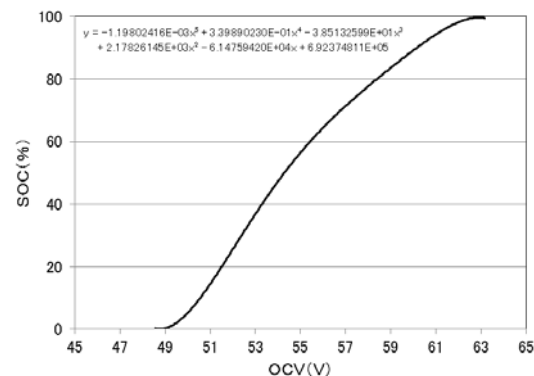


図-8 開回路電圧とSOCの関係（組電池）

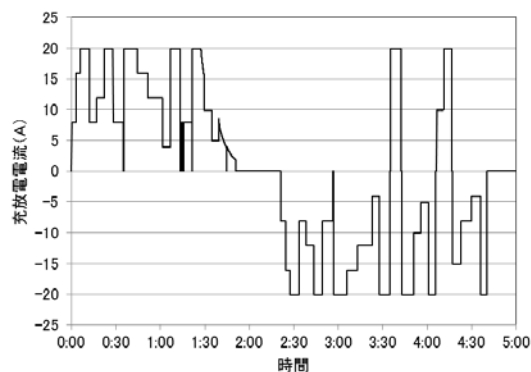


図-9 充放電電流パターン

表－4 蓄電池容量の推定

	電流積算 (Ah)	開回路電圧(V)		SOC(%)		容量推定 (Ah)
		充放電前	充放電後	充放電前	充放電後	
充電	22.655	51.8	58.24	23.3	79.13	40.58
放電	-22.551	58.24	51.78	79.13	23.07	40.23

また、表－4では充放電間で容量推定値に差を生じており、充電のほうが推定容量が大きい。この原因として制御装置での電流消費(0.0257A)により、実際の電池の充電量は外部での計測値より小さく、放電量は外部での計測値より大きいことが考えられる。そこで、開回路電圧測定の間(30分間)も含めた充放電時間に制御装置が消費すると予想される電流積算値を補正した結果を表－5に示す。制御装置の消費電流を考慮することで充放電間の差異が小さくなっている。残りの差異は開回路電圧測定のための放置時間が短く(30分間)、電圧測定に誤差がある(充電時は高めに、放電時は低めになる)ことが原因と考えられる。

表－5 制御装置の消費電力を考慮した容量推定

	電流積算 (Ah)	制御装置 (Ah)	補正電流 積算(Ah)	開回路電圧(V)		SOC(%)		容量推定 (Ah)
				前	後	前	後	
充電	22.655	-0.06	22.595	51.8	58.24	23.3	79.13	40.47
放電	-22.551	-0.072	-22.623	58.24	51.78	79.13	23.07	40.35

3.3 運用中データから放電容量を推定する本方法の課題

この蓄電池容量推定手法の課題は下記のとおりである。

- ・蓄電池の特性試験を行って、開回路電圧とSOC(運転最高温度基準 例えば40℃)の関係を精度よく調査しておく必要がある。試験はモジュールや単電池でも代用可能であるが、誤差を少なくするためには単電池直列数を増やして電圧を高くするほうが良い。
- ・短時間周期で電流を測定し、充放電電流の積算を精度よく行う必要がある。
- ・運用中に30～60分程度(停止時間は長いほうが精度が上がるので1時間以上できれば2時間以上が望ましい)充放電を停止し、開回路電圧を測定する必要がある。
- ・式③で示すとおり、容量推定値の精度を上げるためには、高SOCと低SOCの状態が開回路電圧測定を行い、その間の充放電電流積算値を使用することが望ましい。このうち、充放電電流の積算は、SOC管理のために通常実施されることから、特に問題ないと考えられる。開回路電圧測定はSOC測定の精度向上に必要なため時々実施される。このように通常の運用中計測でかなりの部分は対応できると考えられることか

ら、この容量推定手法は大きな手間をかけずに実施できると考えられる。ただし、年1回程度、0～100%の充放電試験を行って放電容量を測定することは、容量推定精度確認のためにも必要と考えられる。

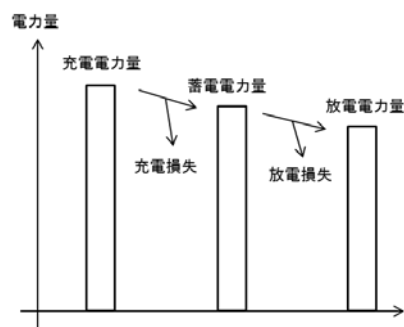
4. 蓄電量の電力量での表示

4.1 蓄電量を電力量表示するための課題

蓄電池のクーロン効率(放電Ah/充電Ah)はほぼ100%であることから、充放電電流を積算したものを蓄電量とすることができる。一方で蓄電池には充放電に伴う電力損失があり、さらに蓄電池の電力損失は充放電電流の大きさに変動することから、単純に蓄電池の充放電電力を測定し積算しても蓄電池の蓄電量を正確に知ることはできない。逆に損失を予想できれば正味の蓄電量を推定することはできると考えられる。すなわち、正味の充電電力=充電電力-充電に伴う損失電力、正味の放電電力=放電電力+放電に伴う損失電力と考えられ(図－10)、正味の充放電電力を積算すれば、蓄電電力量を正確に把握できると考えられる。また損失として、制御装置の消費電力量も考慮する必要がある。さらに、このように損失を考慮した蓄電電力量は正味の蓄電量であることから、SOCと1:1の関係があると考えられ、開回路電圧→SOC→蓄電電力量の関係から、開回路電圧から蓄電電力量の推定も可能になると考えられる。

すなわち、蓄電量を電力量で表示するためには、下記特性を明らかにする必要がある。

- ・充放電電流と充電損失、放電損失の関係を明らかにする。
- ・制御装置等の損失を明らかにする。
- ・蓄電池のSOC(蓄電Ah)と蓄電Whの関係を明らかにする。



図－10 蓄電電力量管理のイメージ図

4.2 蓄電池を使った実験結果

実際に実電池の損失を考慮した蓄電電力量を求めて、電流基準のSOCとの関係を調査した。

(1) 制御装置消費電力量の推定

蓄電池 (40 Ah、2.2 kWh) 制御装置の構成を図-11に示す。制御装置は2階層となっており、組電池の個々の単電池を制御するCMS (セルマネージメントシステム) と蓄電池全体を制御するBMS (バッテリーマネージメントシステム) から構成される。CMSは組電池から電源を供給する構成となっている。BMSは今回は外部から電源を供給している (もちろん組電池からの供給も可能)。

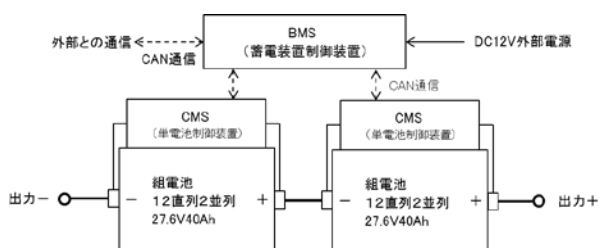


図-11 蓄電池制御装置構成

したがって、蓄電装置の制御装置損失はCMSだけが対象となっている。蓄電装置を放置すると電力を消費し蓄電Ah (SOC)が低下することがわかっており、蓄電池のクーロン効率はほぼ100% (電池そのものは放置中や充放電中にAhを消費しない) と考えられることから、蓄電Ahの低下は制御装置の消費電力に相当すると考えられる。そこで、充放電実験時の充電Ahと放電Ahを比較した。充放電電流値 (充電電流値と放電電流値は等しくした) を0.1C~0.5C (4A~20A) の間で0.1C (4A) 刻みで変化させて充放電実験を行い、充放電時間、充放電Ah、充放電Whを測定した。試験温度は25°C (室温) とした。

充放電1サイクル時 (SOC0~100%) のAhの差 (充電Ah - 放電Ah) およびWhの差 (充電Wh - 放電Wh) を図-12に示す。充放電電流が少ない (充放電時間が長い) ほうがAhの差は大きくなっており、これは充放電時間の長さが影響していると考えられる。充放電時間 (充電開始~放電終了) を図-13に示す。充放電時間は充放電電流と反比例の関係にある。休止時間含みの充放電時間と充放電時のAh差を図-14に示す。充放電時間と充放電時のAh差は比例関係にあり一定となっていること、制御装置以外に電力を消

費する要因がないことから、このAh差は制御装置の消費電力に相当すると考えることができる。Ah差に蓄電装置平均電圧 (充放電Wh / 充放電Ah) をかけて消費電力量 (Wh) に換算した結果およびそれを休止時間含みの充放電時間で割り消費電力に換算した結果を図-15に示す。制御装置の消費電力はほぼ一定値となっており、平均値は1.41W (電流値は0.0257A) である。

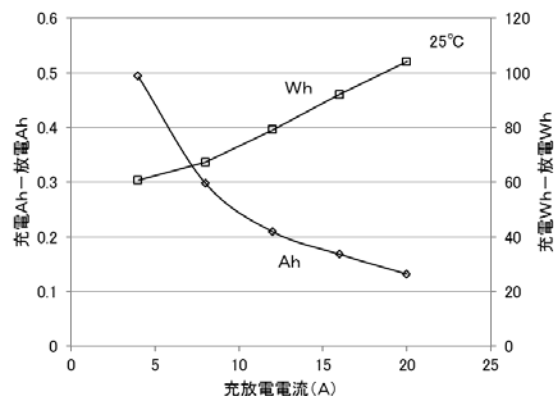


図-12 充放電のAh差、Wh差

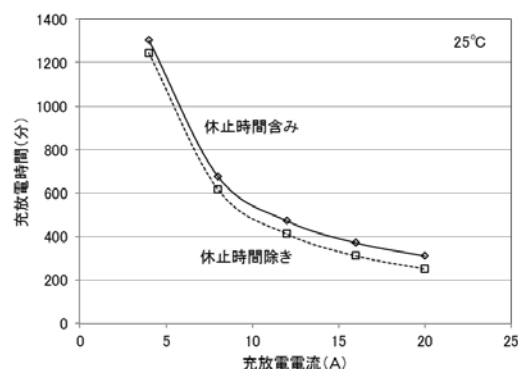


図-13 充放電時間

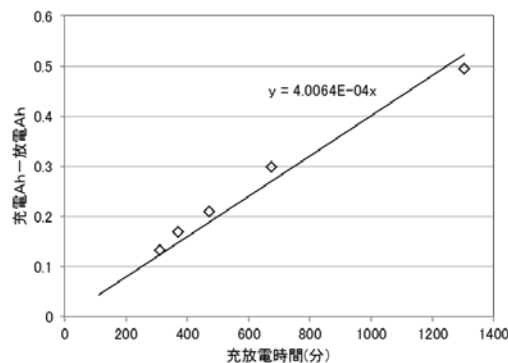


図-14 充放電時間とAh差の関係

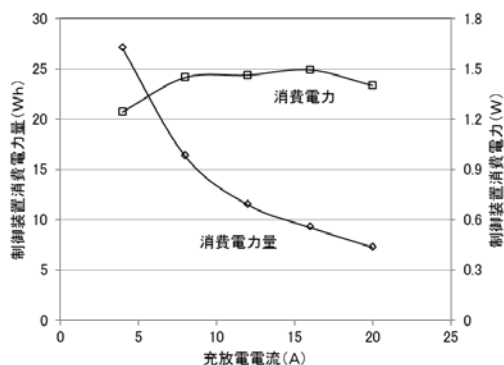


図-1 5 制御装置消費電力

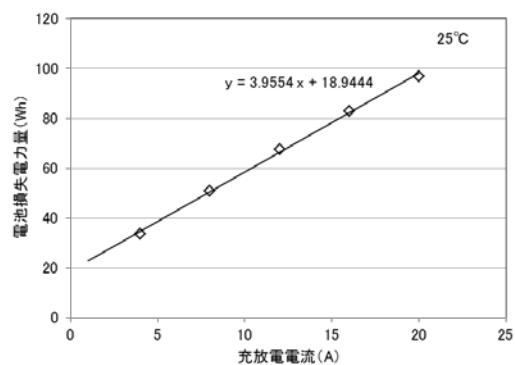


図-1 6 蓄電池損失電力量

(2) 蓄電池充放電損失の推定

蓄電装置の充放電に伴う損失電力量 (Wh 差) から制御装置の消費電力量を除いた分は、蓄電池の損失電力量と考えられる。図-1 2 に示す蓄電装置の損失 (Wh 差) から図-1 5 の制御装置消費電力量を除いた結果を図-1 6 に示す。蓄電池損失電力量 (Wh) は充放電電流の一次関数となっており、充放電時間が充放電電流の反比例となることを考慮すると蓄電池損失電力 (W) は充放電電流に比例する部分と充放電電流の二乗に比例する部分からなっていることがわかる。蓄電装置損失電力量を充放電時間で割って求めた蓄電装置損失電力を図-1 7 に示す。なお、この場合の充放電時間は休止時間除き (休止中は充放電電流零なので損失なし) とした。

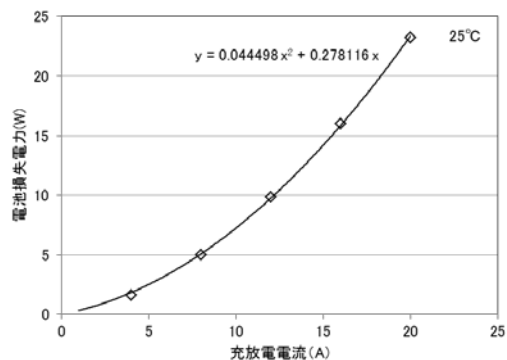


図-1 7 蓄電池損失電力

(3) 蓄電池損失の充電時損失・放電時損失の分離

これまでは充電電流と放電電流が同じで充放電全体での損失を評価してきたが、通常は充電電流と放電電流の大きさは異なることから充電時の損失と放電時の損失を分離する必要がある。そこで、充電電流と放電電流を変えて同様の試験を行いそれぞれの損失を求めた (図-1 8)。充放電時の損失は内部抵抗による電圧損失と考えられ、電流の値が同じであれば充電時と放電時の損失はほぼ同じと予想される。充電時と放電時の損失は電流の大きさが同じであれば同じと仮定して、充放電電流値から予想される損失電力量値と充放電時間から予想される制御装置消費電力量を加えた全損失電力量予想値と実測値を比較した結果を図-1 9 に示す。予想値と実測値がほぼ一致していることから、この考え方で蓄電池の損失は予想できると考えられる。

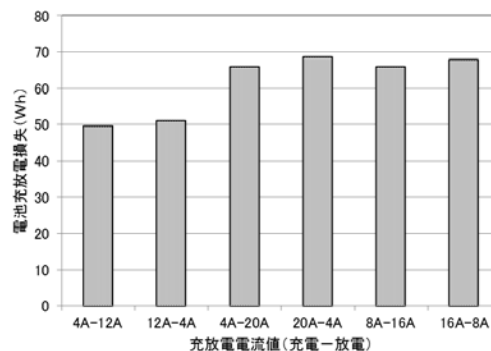


図-1 8 蓄電池損失実測値

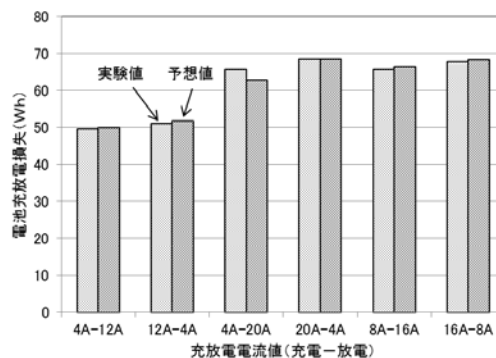


図-1 9 蓄電池損失予想値・実測値比較

これまでの検討は、完全放電～満充電時の損失で評価を行ったが、内部抵抗値が一定であれば、充放電損失電力は一定値として扱うことができ、充放電電流が同じ部分的な充放電における損失も同じと考えられる。今回実験に使用している蓄電池の内部抵抗値は、SOC 20～85%の範囲ではほぼ一定であり、また、この範囲は通常の運用範囲とほぼ等しい。そこで、SOC範囲を20～85%として充放電試験を行い、その際の損失を求めた。損失電力量の測定結果を図-20、損失電力の測定結果を図-21に示す。SOC範囲を制限しても図-16、17と同様の特性となっている。内部抵抗の大きいSOC範囲を除いたことから、損失電力は先の0～100%の範囲の値より小さくなっている。

また、損失電力量は温度の影響を受ける（温度が低下すると内部抵抗が増加し損失が増える）と考えられるが、今回の実験では装置の制約（温度調整範囲が狭い）のため、温度特性までは調査できなかった。

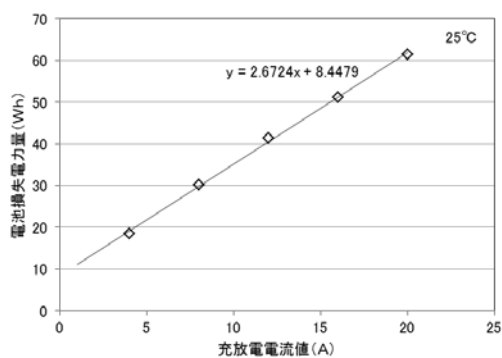


図-20 蓄電池損失電力量

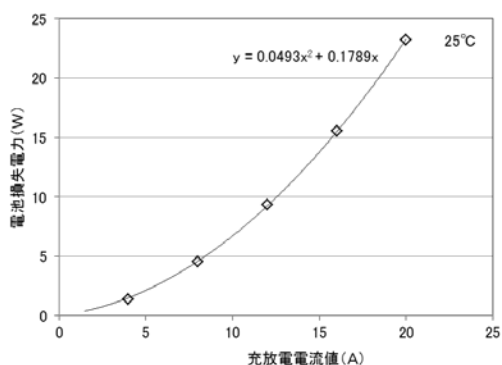


図-21 蓄電池損失電力

(4) 蓄電Ahと蓄電Whの関係

蓄電池充放電時の損失特性が明らかになったことから、蓄電Ahと蓄電Whの関係を評価する。また、蓄電Ahは開回路電圧から推定できることから、蓄電池電圧範囲を47～63.5Vとした際の開回路電圧とSOC

の関係を図-22に示す。なお、SOCは制御装置の消費電流(0.0257A)を考慮しており、同時に実施した放電容量試験結果は40.9Ahであった。0.2C(8A)で充放電した場合の、蓄電Ahと蓄電Whの関係を図-23に示す。同様に制御装置の消費電流を考慮している。また、蓄電Whに関しては蓄電池損失も考慮し、充電電力量から蓄電池損失および制御装置消費電力を除いたものを蓄電Whとしている。図-23の電流積算値の最大値を100%、電力積算値の最大値を100%とした関係を図-24に示す。蓄電Whは電池電圧変化の影響を受けるため、わずかに下に凸のカーブとなっている。直線からの誤差は数%であり、この原因は電池電圧の変化(SOCが高くなるにつれて電池電圧が高くなる)である。電池が劣化してもこの関係は変わらないため、電池固有の特性である。図-22から開回路電圧によりSOCを求め、図-24からSOCにより蓄電電力量を求めることができる。もちろん蓄電電力量は充放電電力測定値と蓄電池損失および制御装置消費電力からも求めることができる。SOCから求めた蓄電電力量と実測から求めた蓄電電力量が一致すれば、以上の蓄電Ahと蓄電Whの関係は正しいということになる。

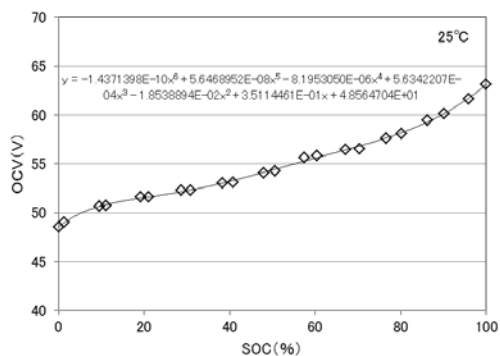


図-22 SOCと開回路電圧の関係

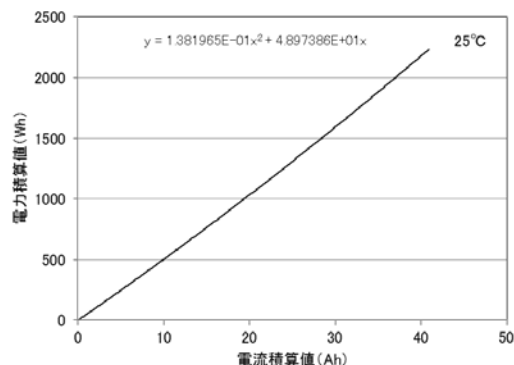


図-23 蓄電Ahと蓄電Whの関係

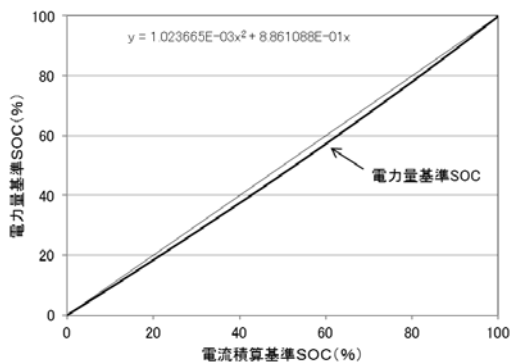


図-2-4 相対的なAhとWhの関係

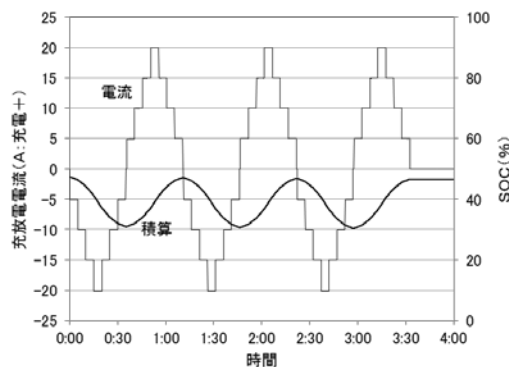


図-2-7 充放電パターン3

(5) 充放電実験

変動の大きな充放電を行い、SOCから推定した蓄電電力量と蓄電電力量実測値が一致するかどうかを確認した。充放電パターンを図-25~27に示す。充放電パターン1(図-25)、2(図-26)は満充電から変動しながら放電していくパターンである。SOC範囲の影響を見るため、パターン1は放電幅を大きくパターン2は小さくしている。充放電パターン3(図-27)は充放電を同じだけ行うパターンであり、電流基準SOCでは前後で変わらない(正確には制御装置消費分若干減少する)。

充放電パターン1で運転した結果のSOCの値や蓄電電力量と蓄電電力量実測値を表-6に、充放電パターン2の場合を表-7に、充放電パターン3の場合を表-8に示す。いずれの場合もOCVから推定した蓄電電力量と損失を除いて求めた蓄電電力量実測値はかなり一致しており、電流積算値から求めたSOCで蓄電量を推定した場合もほぼ同等の結果となっている。このように損失を考慮することで蓄電量を蓄電電力量で表示することは可能と考えられる。

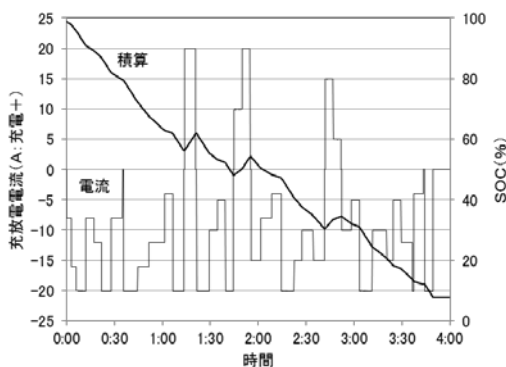


図-2-5 充放電パターン1

表-6 充放電パターン1での蓄電電力量予想値および実測値

		SOC(%)	蓄電量(Wh)	差分(Wh)
OCVによるSOC推定値から蓄電量推定	開始時	98.8	2207.1	-2039.1
	終了時	8.3	168	
電流積算によるSOC計算値から蓄電量推定	開始時	98.8	2207.1	-2047.3
	終了時	7.9	159.8	
充放電電力量測定値	開始時0	-	-2007	-2007
蓄電電力量実測値(損失除き充放電電力量)	開始時0	-	-2061.5	-2061.5

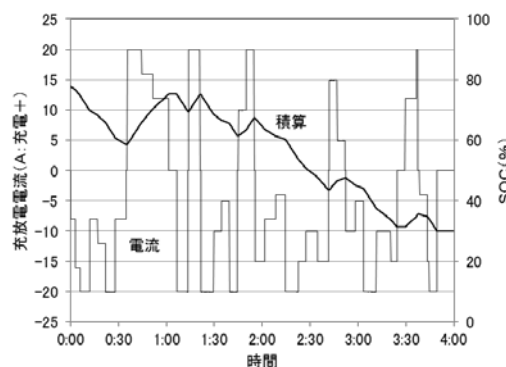


図-2-6 充放電パターン2

表-7 充放電パターン2での蓄電電力量予想値および実測値

		SOC(%)	蓄電量(Wh)	差分(Wh)
OCVによるSOC推定値から蓄電量推定	開始時	77.7	1697.7	-1060.3
	終了時	30.7	637.4	
電流積算によるSOC計算値から蓄電量推定	開始時	77.7	1697.7	-1075.4
	終了時	30	622.3	
充放電電力量測定値	開始時0	-	-1020.8	-1020.8
蓄電電力量実測値(損失除き充放電電力量)	開始時0	-	-1074	-1074

表-8 充放電パターン3での蓄電電力量予想値および実測値

		SOC(%)	蓄電量(Wh)	差分(Wh)
OCVによるSOC推定値から蓄電量推定	開始時	47.4	1002.4	-24.4
	終了時	46.3	978	
電流積算によるSOC計算値から蓄電量推定	開始時	47.4	1002.4	-20
	終了時	46.5	982.4	
充放電電力量測定値	開始時0	-	13.9	13.9
蓄電電力量実測値(損失除き充放電電力量)	開始時0	-	-26.6	-26.6

4.3 蓄電量の電力量表示に関するまとめ

・蓄電池充放電損失および制御装置消費電力を考慮することで、蓄電量を従来の電流（Ah）と同様に電力量（Wh）で管理可能であり、充放電運用時の電力および電力量管理と整合性を取ることができる。

・制御装置消費電力はほぼ一定と考えられるが、蓄電池の損失は内部抵抗に起因する損失であり、充放電電流の関数および温度の関数になる。また、充電時の損失と放電時の損失は電流値が同じであればほぼ同じと考えることができる。

・蓄電池の蓄電電力量は下記式で推定できる。

充電時蓄電電力量増加＝充電電力量－（充電損失電力量＋制御装置消費電力量）

放電時蓄電電力量減少＝放電電力量＋（放電損失電力量＋制御装置消費電力量）

（充電方向を＋とすれば一つの数式となる）

・蓄電電力量と充放電電流積算値（SOC値）は1：1の関係があり、特に電流積算値および電力積算値を最大値で割った相対値とした場合は、SOC値と蓄電池電圧の相対関係で特性が決まるため、電池劣化に関係なく一定の関係が保たれる。開回路電圧とSOCは1：1の関係があることから、開回路電圧により蓄電電力量相対値の推定が可能である。この関係は運用時に蓄電電力量を推定するための手段となる。

5. 新たな蓄電池の状態監視方法を実現するには

5.1 蓄電池監視装置

上記の新たな蓄電池の状態監視方法は、蓄電池メーカーの標準ではないためこれを実現するためには外付けの監視装置を設置する必要がある。監視装置のイメージを図-28に示す。主な機能は下記のとおりである。

・電流値の積算および充放電停止時の開回路電圧測定による高温時の放電容量を基準としたSOCの算定

・電流値の積算および充放電停止時の開回路電圧測定による高温時の放電容量の推定

・SOCによる蓄電電力量の推定

さらに、蓄電池の制御装置とデータ連係することで下記機能の追加が可能になる。

・単電池のアンバランス監視および均等化処理の実施
・蓄電池構成モジュールの電圧監視による劣化モジュールの発見

・蓄電池の温度異常等の異常監視

さらに、外付けの監視装置であるため蓄電池メーカーを選ばないので、複数メーカーの蓄電装置が混在する環境

で統一的に監視を行うことができる利点もある。

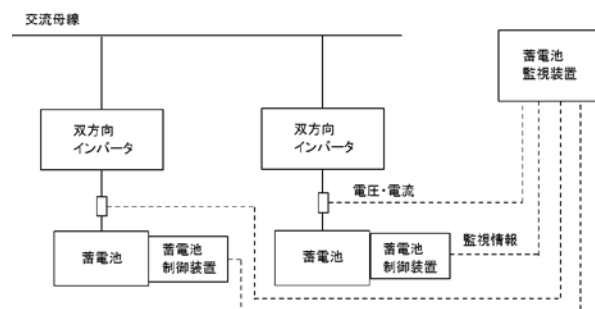


図-28 蓄電池監視装置のイメージ図

5.2 蓄電池の特性試験

上記の新たな蓄電池の状態監視を行うためには、下記特性試験を行いデータを蓄積する必要がある。特に①は必須である。

①高温時の開回路電圧とSOCの関係（図-3、8、22）

開回路電圧からSOCを推定するための基本データ。開回路電圧測定には、充放電停止後3時間以上放置することが望ましい。

②温度と充放電可能範囲の関係（図-4）

充放電可能範囲は運用上重要であるが、実際の運用範囲はSOC20～85%程度に制限されるため、制約にならない可能性大。

③充放電時の制御装置損失および充放電損失（図-20、21）

蓄電量を電力量で管理する場合に必要。制御装置損失は充放電時の電流積算値の差異から、充放電損失は充放電時の電力量差から制御装置損失を除いて求める。また、電池温度が高・中・低の3点以上で測定し、温度特性も加味する必要がある。

6. まとめ

・高温時の蓄電容量（Ah）を基準としたSOCで、蓄電池の蓄電量を統一的に管理できる。

・開回路電圧と高温時の蓄電容量（Ah）を基準としたSOCの間に1：1の関係があることを利用して、開回路電圧からSOCを推定し、その間の充放電電流積算値から蓄電容量を推定することができる。

・制御装置消費電力や蓄電池充放電損失を考慮することで、蓄電池の蓄電量を電力量で管理できる。

・以上の管理を実現するためには、外付けの監視装置を設置する必要がある。

7. むすび

本報告で取り上げた蓄電池の新たな状態表示の方法は、蓄電池のSOCが制御上非常に重要な監視パラメータでありながら、蓄電池に付属する制御装置のSOC表示の精度があまりに悪く、蓄電池制御の監視パラメータとして使いものにならないことが判明したこと、状態表示方法の実用的な改善方法に関して具体的な手法を提案する文献等が見あたらない（SOCの推定方法の特許公開情報はいくつかある）ことから、必要に迫られて考案したものである。

コストのかかる外付けの監視装置に関しては否定的な意見もあるが、コスト削減のために蓄電池容量を少なめにする場合は、蓄電量の正確な推定は不可欠と考えここに提案した。外付けの監視装置の必要性は今後の大型蓄電池普及課程において自ずと明らかになると思われ、本報告がその必要性検討の一助になれば幸いである。

[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。