

鉛バッテリー状態検知センサ ～抵抗比を用いたバッテリー満充電検知技術の開発～

Lead-acid Battery State Sensor

～Development of Battery Full Charge Detection Technique With Internal Resistance～

岩根 典靖*
Noriyasu Iwane

〈概要〉

当社は車載鉛バッテリーの状態検知センサの唯一の日系サプライヤとして上市に成功したが、その後もロジック改善による精度改善を進めシェア拡大に向けた取り組みを継続している。バッテリー状態検知センサにおける最重要検知項目がバッテリーの充電率(SOC=State of Charge)である点は車両の最適燃費制御、車両電源の信頼性確保の観点から不変であると考えられる。SOCの推定精度向上には複数の要素技術を組み合わせる必要があるが、中でも満充電検知が代表的な要素技術として挙げられる。その目的はバッテリーが満充電近くなったことを検知し、この時のSOCを満充電検知SOCとして設定し、以降の起点とすることである。したがってこの精度がその後の推定精度全体に影響を与える。我々は充電時の内部抵抗増加とパルス放電によるバッテリー等価回路モデル学習を組み合わせた独自指標“抵抗比”による満充電検知技術を開発し、SOC検知精度の向上に成功したのでその概要を報告する。

1. はじめに

昨今の自動車における電装部品の増加や、アイドリングストップなどの最適燃費制御の一般化に伴い、車両電源の信頼性向上が求められている。そのため車載鉛バッテリーに関しても状態を監視して信頼性を確保する鉛バッテリー状態検知センサの搭載が一般化しつつある。当社はこの鉛バッテリー状態検知センサの唯一の日系サプライヤとしてBattery State Sensor (BSS)を2012年度に初上市し、現在では累計1,000万台以上を出荷するに至っている。今後自動運転に対応した電源品質の確保の必要性から電源系全体の構成の大幅な変化が予想される状況ではあるが、今後も鉛バッテリー状態検知センサの市場規模は拡大傾向を継続することが見込まれており、当社はこれに平行して性能向上により競争力を強化し、シェア拡大が図れるよう取り組んでいる。図1にBSSの製品例を示す。

BSSに求められる最も基本的な機能は満充電容量に対してその時点の充電率を推定することである。これはその時点のバッテリーの電力供給能力の指標であり、アイドリングストップに代表される車両の最適燃費制御に用いる基本情報でもあるため、常に現状からの精度改善、信頼性向上が求められている。精度向上を実現するためには複数の異なる要素技術を適切に組み合わせる必要があるが、その中でも重要なものの一つとしてバッテリーが略満充電に達したことを検知する満充電検知が挙げられる。この役割はSOC推定精度を高め、かつ安定した電力

供給能力を確保するために、バッテリーが満充電に近づいた兆候を検知し、検知されたタイミングでSOCを100%、あるいはより確からしい100%近傍の満充電検知SOC値に切り替えることによって蓄積された推定誤差を解消することである。この満充電検知はその後のSOC推定精度に影響を与えるため重要であり、各社とも最適な検知ロジック構築に向け努力を重ねている部分である。

当社はバッテリーが満充電近傍で充電時の内部抵抗が上昇する特性を有することに着目し、更に当社独自のパルス放電によるバッテリー等価回路モデル¹⁾学習技術を組み合わせることによって当社独自の検知指標“抵抗比”を考案し、これを用いて異なるバッテリーサイズ、メーカーでも精度が維持できる技術を開発した。また検知における主要な外乱的誤差因子に対応できる補正技術を併せて開発し、車載環境として実用的な範囲で精度を維持できるロジックとすることに成功した。



図1 バッテリー状態検知センサ (古河AS製)
Battery state sensor (made by FAS).

* 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

2. SOC推定と満充電検知

SOCを実際の車両において直接計測することは不可能である。したがって車載環境で計測できる電流、電圧、温度の情報を基にした推定計算がBSSに求められる最重要機能である。この推定計算の大きな柱としては充放電電流によるSOC変化を算出する電流積算と、鉛バッテリーのSOCが安定開回路電圧(OCV=Open Circuit Voltage)と直線相関を持つ²⁾ことを利用した安定OCVを基にしたSOC計算が挙げられるが、車載される鉛バッテリーで精度を確保する上では解消しなければならない課題がある。まず電流積算に関しては、出し入れした電気がSOC何%分に相当するかを換算する際に満充電容量の誤差が重畳される。満充電容量は劣化によって徐々に低下していき、これがSOC精度確保の障害となる。(1)式にSOCと満充電容量の関係を示す。

$$SOC = (\text{充電されている電気量} / \text{満充電容量}) * 100 \quad (1)$$

次に安定OCVと直線相関に関しては実車環境で正確な安定OCVを測定することが難しい点が挙げられる。これは実車では運行中は常にバッテリーに充電電流あるいは放電電流が流れており、分極が付加された状態に置かれることに起因する。一旦付加された分極が解消するまでは長い無電流での休止時間が必要であり、週末ドライバーのようなケース以外は直接測定することはほぼ不可能である。当社はこれまでに分極が解消していく過程から安定OCVを推定する独自技術^{3),4)}を開発し、SOC推定誤差低減に成功しているが、誤差を完全に解消できていないわけではない。また仮に誤差のない安定OCVが測定できたとしても電圧値に対するSOCの値は個々のバッテリーによって異なるため、精度を維持するためには車両ごとに搭載バッテリーに対応した相関式を与える必要がある。しかし実際にはこのような合わせ込みは不可能であり、この個体差がSOC推定誤差となる。また、バッテリーの使用が進むにつれて電解液濃度変化、劣化などの影響で初期の相関から変化してしまう。

これらの精度上の制約の中で安定した電源性能を確保する方法として、SOCが100%近傍の満充電状態になったことを検知し、この時点のSOCを100%、あるいは満充電検知SOC値に切り替え、ここを起点として一定範囲内でSOCがコントロールできるように計算・制御を行う手法が一般的に用いられている。また、これに加えて安定OCVとSOCとの直線相関(OCV-SOC相関)の個体差、劣化などの変化による誤差発生を抑えSOC推定精度を維持するために、満充電検知機能を活用してOCV-SOC相関を搭載バッテリーに適合するように合わせ込むことも行われている。

3. 開発技術の内容

3.1. “抵抗比”を用いた満充電検知

前述のようにバッテリーの満充電検知が従来から行われてきたが、具体的な手法としては主に充電時の電流の挙動が用いられてきた。図2に外乱の影響のない同一条件で充電した場合のSOCと充電電流の関係をサイズ、メーカーの異なる複数のバッテリーで実測した例を示す。

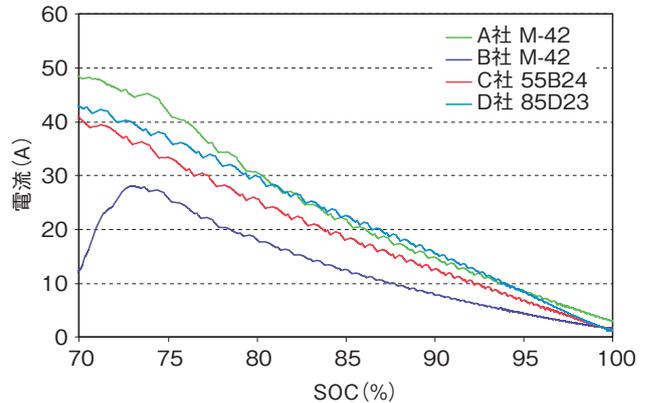


図2 充電電流とSOCの相関
Relation between the charging current and the SOC.

図2に示すとおり、充電が進みSOCが上昇するにつれてバッテリーに充電される電流は減少していく。この電流の減少を指標とする検知が最も一般的な手法として多用されている。一方で図2から分かるとおり、SOC上昇に従った電流の減少はなだらかであり、明確なしきい値の設定が難しい。また、同じ電流しきい値を設定した場合、例え同一サイズのバッテリーであっても充電電流とSOCの関係に大きな差があるケースも確認されている。図2では例えばしきい値電流を5Aに設定した場合、実際のSOCは93%～98%の開きがある。当然外乱の影響を考慮した場合誤差は大幅に膨らみ、単純に電流値にしきい値を設定するだけでは高精度な満充電検知は実現できないと予想できる。

上記に対する改善手法として、我々はまず充電時の抵抗を指標とすることを試行した。式(2)に充電時の抵抗 R_{charge} の考え方を示す。

$$R_{charge} = \Delta V / I \quad (2)$$

ΔV : 充電電圧と開回路電圧の差

I : 充電電流

抵抗を指標とするメリットは式(2)で分かるとおり電流が計算式分母になるため、電流減少にしたがって双曲線の形で大きく上昇し、検知感度の向上の実現、容易なしきい値設定が可能となる。

また、もう一つ課題である充電時の電流挙動のバッテリー個体差による誤差に対する対策として、当社BSSの特長であるパルス放電による等価回路モデル学習技術から得られる内部抵抗成分を組み合わせることを試行した。図3に鉛バッテリーの等価回路モデルの例を示す。

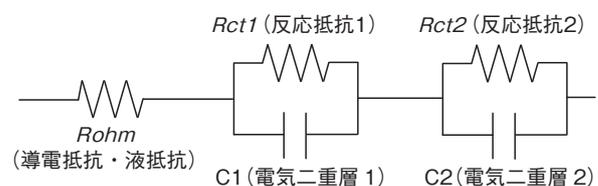


図3 バッテリー等価回路モデル例
An example of the equivalent circuit model.

当社の鉛バッテリー状態検知技術の大きな柱の一つが車両休止期間中にパルス放電を実施し、バッテリー内の各抵抗要素を含む等価回路モデルを学習することであり、この学習値を基にバッテリーの状態を推定する⁵⁾。この車両休止中のパルス放電内部抵抗はバッテリーのサイズ、設計による内部抵抗の違い、或いは劣化による変化を反映するため、これを用いて充電時の抵抗を補正すればバッテリーの個体差の影響を改善できるのではないかと考えた。検討の結果我々は独自の指標である抵抗比 R_ratio を考案、策定した。式(3)に抵抗比(R_ratio)の考え方を示す。

$$R_ratio = f(R_charge, Rohm, Rct1) \quad (3)$$

f は R_ratio を算出する関数式であり、充電抵抗 R_charge とパルス放電によって学習される $Rohm$ と $Rct1$ が入力として与えられる。図3に示すとおり $Rohm$ は搭載バッテリーの導電抵抗、液抵抗を反映し、 $Rct1$ はパルス放電時の反応抵抗を反映している。最適化された計算式及び係数で計算された抵抗比 R_ratio とSOCの相関を図4に示す。

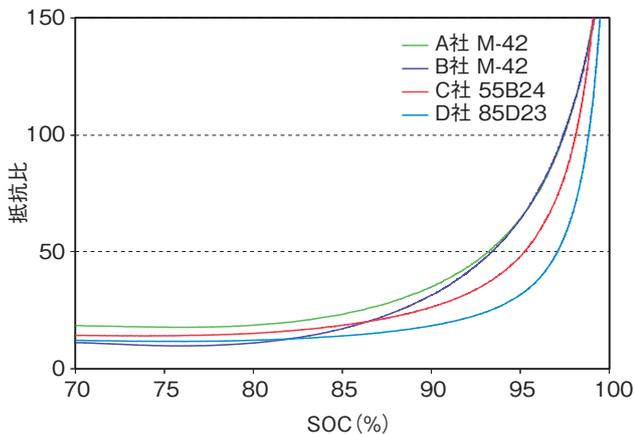


図4 抵抗比とSOCの相関
Relation between R_ratio and SOC.

図2において電流のしきい値を5Aとした場合と検知までの所要時間の平均がほぼ同じとなる抵抗比のしきい値120を設定した。その結果図4における実際のSOCの範囲は97%～98%であり、単純な電流を指標とした場合の1/5の推定誤差とすることができた。このように当社独自の指標“抵抗比= R_ratio ”を用いることによって高感度でバッテリーの個体差の影響の少ない検知が実現できた。

3.2. 満充電検知に影響を与える要因

前記図4で示しているのは、すべてのバッテリーを同じ条件で充電した場合の結果であり、実際には使用環境の違いによって抵抗比とSOCの相関は異なってくる。この違いが満充電検知における大きな外乱的誤差要因となる。主要な要因としては下記の3つが挙げられる。

- ①温度
- ②充電開始SOC
- ③充電電圧

それぞれの影響の現れ方を以下に順次説明していく。

図5に温度以外の条件を固定(充電開始SOC=70%, 充電電圧=14.4 V)して温度を水準とした時の抵抗比とSOCの相関の例を示す。

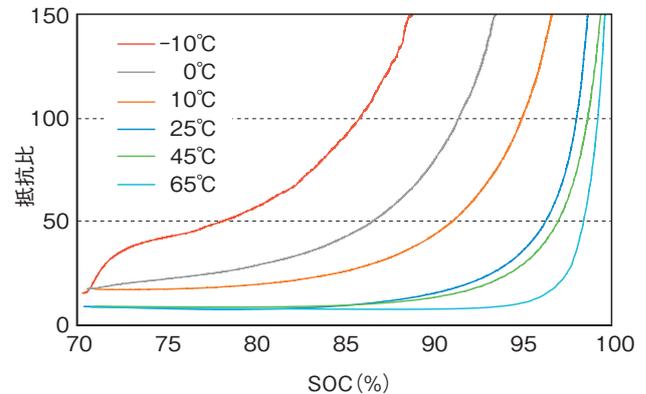


図5 温度違いによる抵抗比とSOCの相関の違い
Difference of the relation between the resistance ratio and the SOC caused by the different temperature.

図のとおり低温になるほど低いSOCで抵抗比が上昇する傾向があることが分かる。しきい値120と設定した場合、抵抗比を用いて感度、精度を向上させたとしても-10°C～65°CではSOC=87%～99%の開きがある。したがって温度が異なる場合はこれに対応して適切なSOC値としなければ精度の高い満充電検知とならないことが分かる。

次に図6に充電開始SOC以外の条件を固定(温度=25°C, 充電電圧=14.4 V)し、充電開始SOCを水準とした時の抵抗比とSOCの相関の例を示す。

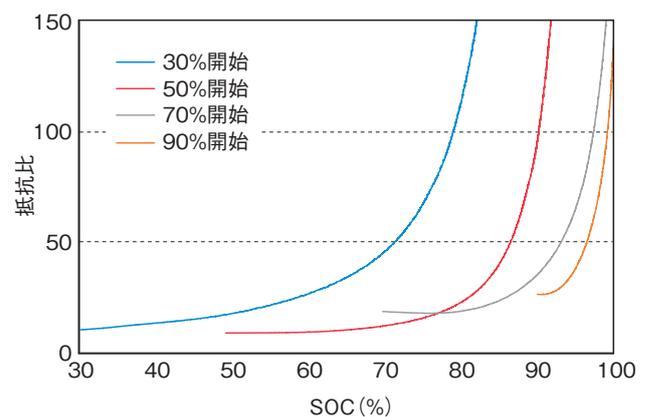


図6 充電開始SOC違いによる抵抗比とSOCの相関の違い
Difference of the relation between the resistance ratio and the SOC caused by difference of SOC at initial charging.

図のとおり充電開始SOCが低いほど低いSOCで抵抗比が上昇し、前記と同様にしきい値120と設定した場合、検知時のSOCには大きな開きがある。実際にはSOC=30%から充電されて1回の走行で満充電に到達するというケースはまれであるが、仮にここまでの条件を想定した場合検知時のSOCは73%

～99%となり26%の開きとなる。したがって充電開始SOCが異なる場合は温度と同様これに対応した適切なSOC値でなければ精度の高い満充電検知とならないことが分かる。

次に図7に充電電圧以外の条件を固定(温度=0℃, 充電開始SOC=70%)し, 充電電圧を水準とした時の抵抗比とSOCの相関の例を示す。

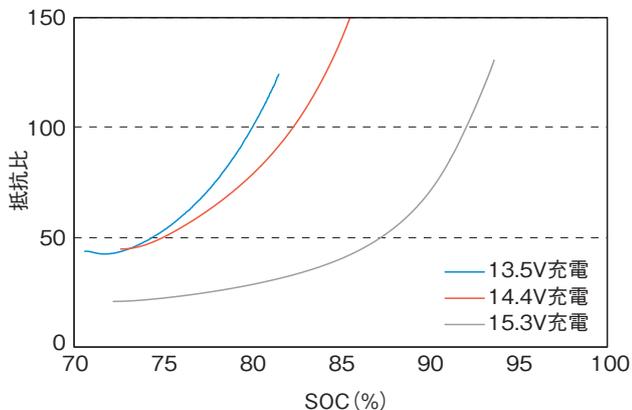


図7 充電電圧違いによる抵抗比とSOCの相関の違い
Difference of the relation between the resistance ratio and the SOC caused by difference of charging voltage.

図のとおり充電電圧が低いほど低いSOCで抵抗比が上昇し, しきい値120と仮定した場合充電電圧13.5 V～15.3 Vを想定した場合, 検知時のSOC範囲は82%～95%となっている。したがって充電電圧が異なる場合も温度と充電開始SOCと同様, これに対応した適切なSOC値でなければ精度の高い満充電検知とならないことが分かる。

以上のように考案した抵抗比は同一条件で充電された状態では様々なメーカー, サイズに対応して高い精度を実現することに成功したが, 実車環境において条件が変動しても精度を維持するためには外乱的誤差要因①温度, ②充電開始SOC, ③充電電圧, の影響を考慮し, 適切な補正を付加する必要がある。

3.3. 外乱的誤差要因への対応

前章で述べた3つの誤差要因に対応する満充電検知とするために, 基本的な下記式(4)のような考えで計算するロジックを策定した。

$$\text{満充電SOC} = g(R_ratio, \text{温度}, \text{充電開始SOC}, \text{充電電圧}) \quad (4)$$

g は満充電検知時のSOCを算出する関数式であり, 検知指標である抵抗比 R_ratio の他に各誤差要因, 温度, 充電開始SOC, 充電電圧を入力とする。前述では図5～7で3つの誤差要因を個々に示したが, 実際にはこれらの影響は独立ではなく互いに影響し, 傾向自体は変わることはないが, 影響の程度は他の条件が変わると連動して変わってくる。そのため実際の式は複雑なものとなるが, 基本的な考え方を最後に策定した充電電圧影響への対応を例に説明する。

下記図8に温度, 充電開始SOCの影響までは対応済みで充電電圧に関しては14.4 V固定を前提とした計算式に対して, 温

度-10～65℃, 充電開始SOC=70～90%の範囲で充電電圧を13.5 V, 14.4 V, 15.5 Vの3段階の水準を含めて推定したときの推定誤差を示す。図7の傾向から分かるとおり下記図8のように低電圧充電の場合, 推定値よりも実際のSOCは低くなる傾向があり, 推定値にプラス側の誤差が乗ることとなる。

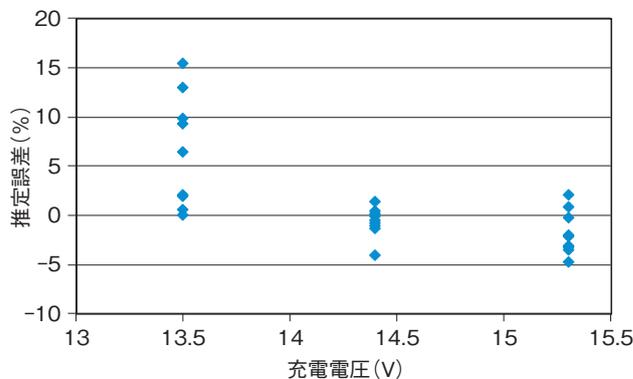


図8 充電電圧が考慮されていないときの満充電推定誤差
Error of the full charge detection when ignoring the charging voltage.

誤差の程度がばらつきを持っているのは前記のように他の条件によって充電電圧の影響が現れる程度が変わるためである。充電電流が変化したときの満充電検知時SOCへの影響の代表的な傾向を下記図9に示す。

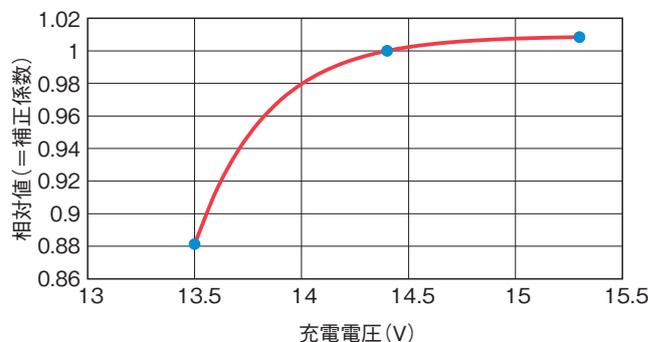


図9 充電電圧が異なる場合の満充電検知時SOC相対値
Normalized SOC at full charge detection against various charging voltage.

図9におけるドットは複数のバッテリーを同一抵抗比で満充電検知したときの各充電電圧での実測SOCの平均を充電電圧14.4 VのときのSOC値の平均で除算して正規化した値(相対値)である。ラインはこの実測ベースのドットに対し, 充電電圧を入力とする関数を当てはめたものである。この関数に実際の充電電圧を代入して算出した相対値を補正係数とすれば, 充電電圧14.4 Vを想定して策定された計算式で算出された推定SOC値にこの補正係数を乗じることによって実際の充電電圧に対応した推定SOCへ補正することが可能となる。

上記が基本的な充電電圧の影響に対する補正の考え方である。しかし図9は温度や充電開始SOCを一定条件に固定しており, 条件が異なると同様な傾向を保ちつつ絶対値は変化する。

温度・充電開始SOCによる充電電圧への影響の程度の差を考慮できるようにするためには多数の条件で図9と同様の解析を行い、前記関数の係数と温度、充電開始SOCの関係を調査し、係数を温度、充電開始SOCの関数に置き換え、補正係数の計算式を充電電圧、温度、充電開始SOCを入力として算出する4次元関数とする必要がある。完全な4次元関数の形を示すのは困難であるため、充電開始SOC=70%を例に充電電圧、温度の3次元の補正係数曲面を下記図10に示す。

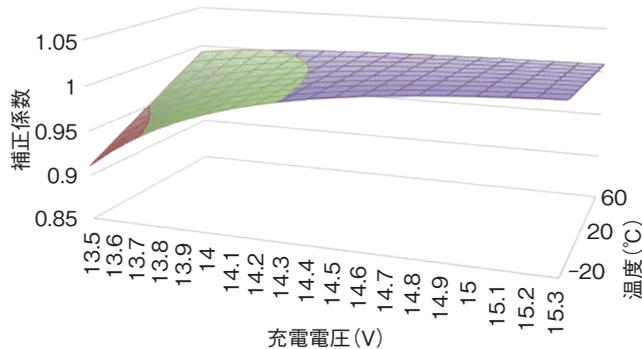


図10 充電電圧補正係数3次元曲面
A 3-dimensional curved surface of correction coefficient vs. charging voltage and temperature.

以上が充電電圧の影響の補正の考え方であるが、温度、充電開始SOCの影響への対応も大枠は同様の考え方である。これらをすべて統合することによって最終的な式(4)となる。充電電圧影響までを対応した式(4)により図8の誤差をから下記図11のように改善することができた。

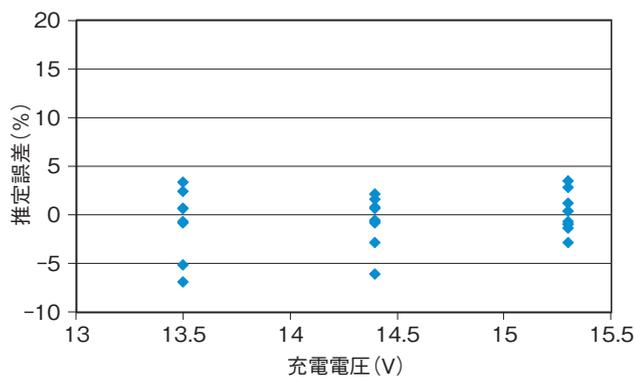


図11 充電電圧を考慮ときの満充電推定誤差
Error of the estimated full charge when considering the charging voltage.

延べ18個の異なる品番のバッテリーで温度-10℃～65℃、充電開始SOC範囲70%以上、充電電圧範囲13.5 V～15.3 Vの範囲での評価データを用いた机上計算で、最大誤差+3.35%～-6.03%の精度での満充電検知を実現が実現できた。

4. おわりに

以上のように我々は独自のパルス放電方式による等価回路モデル学習のメリットを生かした独自指標“抵抗比”の導入と、満充電検知における外乱の影響因子である①温度、②充電開始SOC、③充電電圧、に対応する補正技術の組み合わせにより、実用的な温度、充電開始SOC、充電電圧の範囲内で安定的かつ高精度な満充電検知技術を開発することに成功した。しかし一方で実車環境では今回ロジックを策定した環境のように安定的に充電が付加され続けることは無く、充電電圧の段階的な切り替えのほか目まぐるしく充電、放電が切り替わる。当然実装ロジックにおいては代表的な実車電流、電圧データを基にベンチ環境と同等の精度が保てるように加重平均処理を付加し、それでも精度の維持が難しいと判断した場合は処理をバイパスするガード機能を設けているが、より制約の少ない、使い勝手の良いロジックとなるように継続して改良を進めていく必要がある。

また、満充電検知ではしきい値に到達させるためには一定以上の充電を付加する必要がある。一般にしきい値を厳しくよりSOC=100%に近くなるように設定すればするほど検知時のSOC精度は高くすることができるが、一方で必要な充電継続時間は長くなる。我々は抵抗比の導入によりこの点も改善しているが、車の使われ方は千差万別である。タクシーのように日常的に長時間の運転が期待できる車両では厳しいしきい値による高精度な推定も可能であるが、日常の買い物程度にしか用いられない車両ではほとんど満充電を検知できないという状況に陥ってしまう。当然より短時間で到達できるしきい値設定が検知の頻度の観点からは好ましいが、必要な精度が維持できない検知では無意味である。これに適切に対応するためには自身のロジックのみではなく世に出回る車両の運行時間に関する統計データをバックグラウンドとして検知が確保できる範囲、確率とこれに対応する検知精度を客観的判断できることが必要である。

更に、満充電検知はSOC推定を実現する上での一要素技術である。最終的に求められるのはSOC推定精度の確保であり、他の関連する要素技術もバランス良く精度改善を進め、顧客であるカーメーカー、更には最終ユーザーであるドライバーにとって嬉しさが発現できる技術を開発していく必要がある。

参考文献

- 1) 板垣昌幸:電気化学インピーダンス. 丸善出版(2011).
- 2) 押上勝憲, 馬場厚志, 丸田一郎, 三原輝儀:バッテリーマネージメント工学. 東京電機大学出版局.
- 3) 岩根典靖:鉛バッテリー状態検知センサ, 古河電工時報, 120 (2007), 62.
- 4) 岩根典靖:鉛バッテリー状態検知センサ, 古河電工時報, 132 (2013), 10.
- 5) 岩根典靖, 高橋直也, 光山泰司:動的電流電圧からの鉛バッテリー等価回路モデル学習とこれを用いた応答電圧予測. 2013年度電気化学会秋大会.