

特集：環境

11

次世代バッテリーマネジメント技術の開発 Development of Next Generation Battery Management Technology

久米章友*¹ 庄司明*² 吉田勝正*³ 小谷和也*⁴
Akitomo Kume Akira Shoji Katsumasa Yoshida Kazuya Kotani
平野晴洋*⁵ 福馬勉*⁶ 中野雄介*⁷
Seiyo Hirano Tsutomu Fukuma Yusuke Nakano

要約

マツダは、環境戦略としてi-stop、減速回生と、段階的に電気デバイスを付加していく「ビルディングブロック構想」を進めている。i-stopや減速回生では、バッテリーは大きな充放電が伴うため、バッテリー充電状態（以下、SOC：State Of Charge）が大きく変動する。そのため、バッテリーマネジメント技術によりバッテリーの過放電や早期劣化を防ぐ必要がある。しかしながら、これまでのバッテリーマネジメントでは、バッテリーの分極現象などにより、SOC予測精度に限界があった。今回、分極のメカニズムを理論的に解明することで、SOCの予測精度を大幅に向上させた。更に、バッテリー劣化状態（以下、SOH：State Of Health）、電気デバイスの作動状態（以下、SOF：State Of Function）も考慮したバッテリーマネジメント技術を新たに構築した。

Summary

As an environmental strategy, Mazda is promoting “Building Block Concept”, with which electric devices such as regenerative brakes and i-stop have been phased. As i-stop/regenerative-brake operations require large charge and discharge of a battery, the state of charge (SOC) greatly fluctuates, and excessive discharge and fast deterioration have to be prevented by Battery Management Technology. However, the conventional Battery Management had a limit in SOC prediction precision due to the polarization phenomena of batteries. This time we theoretically clarified the polarization mechanism, and the SOC prediction accuracy is significantly improved. We also established a new Battery Management Technology that considers the state of health (SOH) of batteries and state of function (SOF) of electric devices as well.

1. はじめに

マツダは、電気デバイスのためのバッテリーマネジメント技術を継続的に進化させている。まずは、2003年からオルタネータ減速回生⁽¹⁾を採用した車を市場に導入した。2009年には、i-stop⁽²⁾を採用したアクセラ、ピアンテを市場に導入した。今後は、オルタネータ減速回生とi-stopの両立が求められる。今回、これらを両立する高機能なBMSを開発したので報告する。

2. BMSに求められる機能

(1) SOCの高精度推定

減速回生は、減速時の運動エネルギーをバッテリーに蓄電し、加速時に利用することで燃費を向上させる技術である。より多く蓄電するには、SOCを下げた状態（以下、PSOC：Partial SOC）でバッテリーに充電することが望ましい。一方、バッテリー寿命を維持するために、SOCを必要以上に下げないように管理することが求められる。

そこで、SOCを精度よく制御する必要がある。

*1, 3~6 PTパワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

*7 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

(2) SOF, SOHの高精度推定

アイドリングストップ時、バッテリーは、電装品および再始動時のスタータに電力を供給する必要がある。バッテリーは、大きな充放電が繰り返されることで劣化が進行し、電力供給に問題が生じる。そこで、電力供給の信頼性を確保するためにSOF, SOHを推定する必要がある。

3. SOC推定手法の課題

これまでの、SOC推定手法として満充電法を採用してきた。満充電法とは、エンジンをKEYで始動した直後にバッテリーを満充電状態にしてSOCの初期値“SOC₀”を取得し、その後は、充放電電流の積算でSOCを推定する方法である。

$$SOC = SOC_0 \pm \int Idt / \text{バッテリー容量} \quad (1)$$

PSOCでバッテリーを使用する場合、満充電化による分極の影響が大きくなるため、SOC推定精度が課題となる。分極が発生すると、SOC推定値に対して真のSOCが低い方にずれてしまう (Fig.1)。

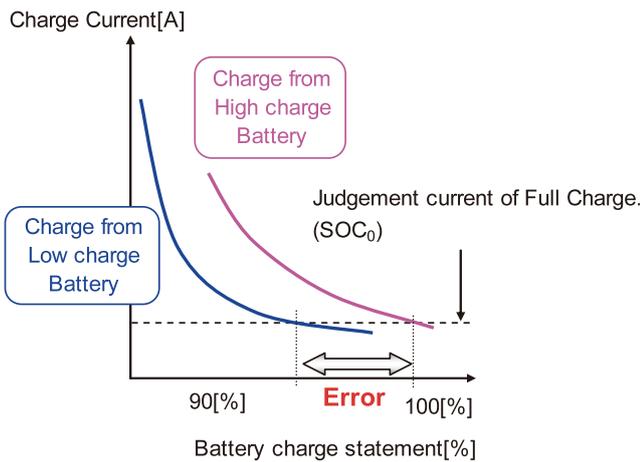


Fig.1 Error of Estimated SOC

この状態が続くとサルフェーションが発生し、バッテリーが早期に劣化してしまう。また、最悪の場合は、過放電や活物質の損失によりアイドリングストップ時の電力供給に問題が生じる (Fig.2)。

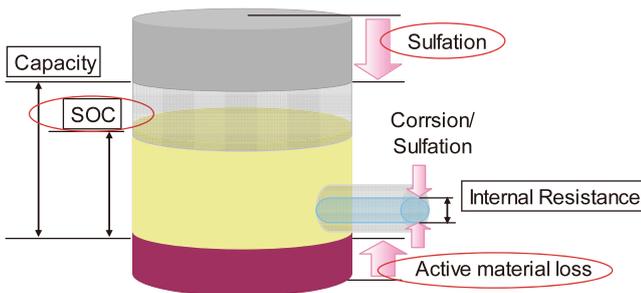


Fig.2 Aging Cause by Over Discharge

分極は、Fig.3に示すようにバッテリーの開放時測定電圧 (以下、OCV : Open Circuit Voltage) が、平行起電力 (以下、EMF : ElectroMotive Force) に対してずれる現象である。これは、電解液濃度が偏ることで発生する。

ここでは、横方向の電解液濃度の偏りで発生する分極を“拡散分極”、縦方向の電解液濃度の偏りで発生する分極を“成層化分極”と呼ぶ (Fig.4)。Fig.5に成層化による電解液濃度変化と電圧の関係を示す。

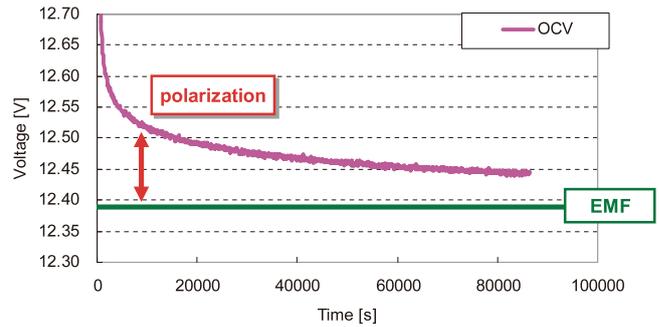


Fig.3 Influence of Polarization

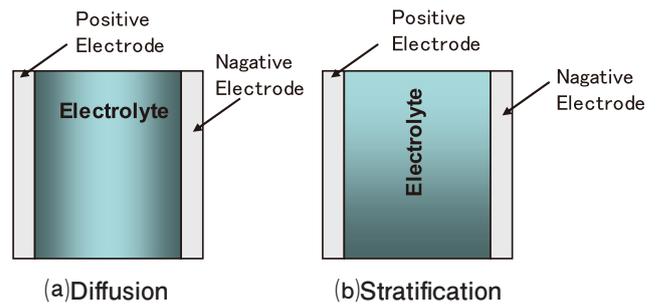


Fig.4 Density Distribution

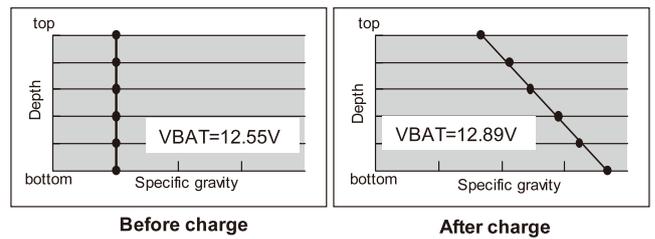


Fig.5 Measure of Stratification

4. 新BMS技術

4.1 OCV法によるSOC推定

SOCを正確に推定するには、分極現象の定量化が必要である。また、満充電化を避け、分極の発生を極力抑えることが望ましい。本来、SOCは、EMFから求めることができる (Fig.6)。そこで、分極を推定する手法を構築し、車両停車中のOCVから分極の影響を除いてSOCを求める“OCV法”を構築した。

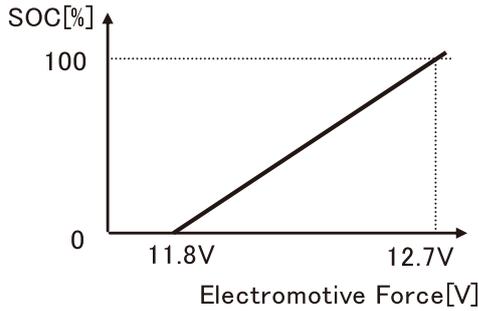


Fig.6 Relations of EMF and SOC

一般的に電解液濃度の拡散現象は、拡散方程式を解くことで表現できる⁽³⁾が、複雑な式のため車両コンピュータへの実装化が困難であった。また、成層化現象については、モデル化の報告事例がほとんどない。そこで、実験解析、計算解析を駆使して分極現象を解析し、二つの分極現象をRC回路モデルで表現した (Fig.7)。実際の挙動と比較した結果、このRC回路モデルが十分な精度で分極量を推定できることがわかった。

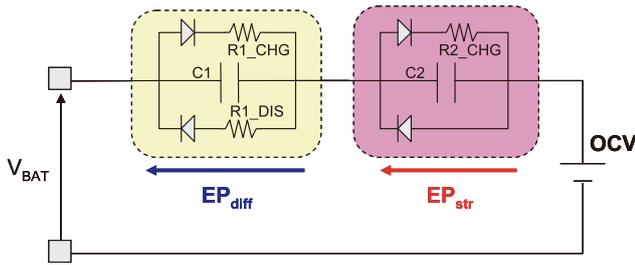


Fig.7 Battery Polarization Model

(1) 拡散分極のモデル化

拡散分極は、充電時に増加していくが、充電を止めると時間とともに減少していく性質がある。よって、拡散分極電圧： $E_{P(D)}$ は、式(2)に示すように電解液濃度変化によるOCV変化： ΔE_P から、SOC変化によるEMF変化： ΔEMF を差し引いたものとなる (Fig.8)。

$$E_{P(D)} = \Delta E_P - \Delta EMF_{(\Delta SOC)} \quad (2)$$

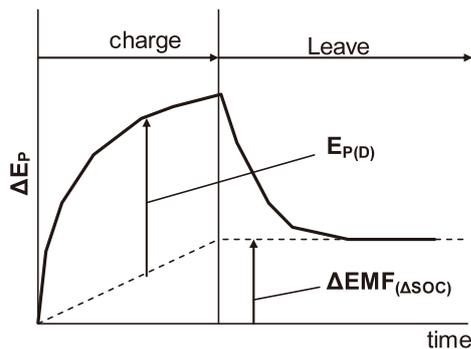


Fig.8 Diffusion Model

これを拡散方程式(3)を用いて表現すると、式(4)となる。

$$\Delta C(x,t) = \frac{i}{2FD} \left[\sqrt{\frac{4Dt}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - x \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \right] \quad (3)$$

$C(x,t)$: 濃度, F :ファラデー定数, D :拡散係数

$$\Delta E_P = \left(\frac{dOCV}{dC} \right) \Delta C(0,t) - \left(\frac{dEMF}{dSOC} \right) \Delta SOC \quad (4)$$

$(dOCV/dC)$: 濃度変化量 dC あたりの OCV 変化量

$(dEMF/dSOC)$: SOC 変化量 $dSOC$ あたりの EMF 変化量

今回、拡散分極をFig.9に示すRC回路モデルで構成し、式(4)の拡散方程式と矩形波応答で比較した結果、ほぼ同等の推定精度が得られることがわかった (Fig.10)。

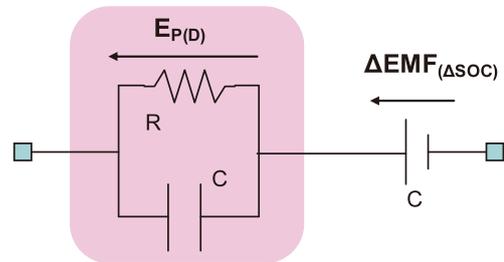


Fig.9 RC Circuit Model

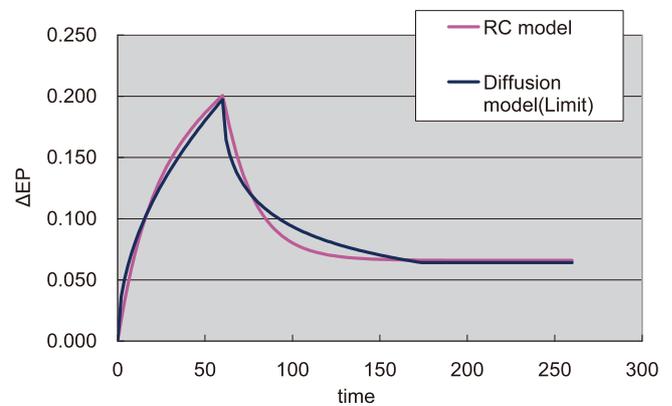


Fig.10 Comparative Result of RC Model and Diffusion Model

(2) 成層化分極のモデル化

充放電に伴う電解液濃度分布を測定した結果、以下の結果を得た。

- ① 電極全体で成層化度合 (垂直方向濃度分布) の増加に応じて、充放電反応も増加している (Fig.11)。
- ② OCVは、電極に接する最大の電解液濃度によって決まる。
- ③ 成層化分極は、充放電量に比例して増加する。

よって、成層化分極は、電解コンデンサと同等のモデルで表されることがわかった (Fig.12)。

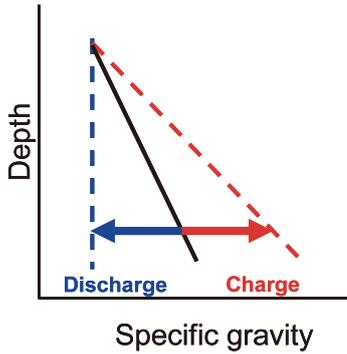


Fig.11 Specific Gravity Change During Charge-Discharge

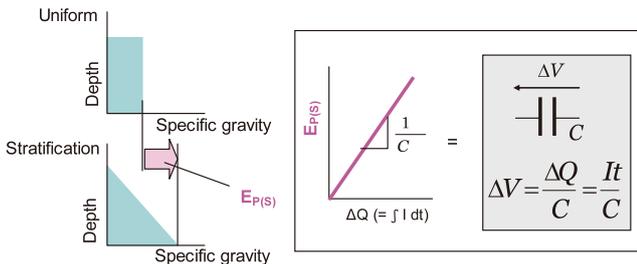


Fig.12 Stratification Model

(3) SOC推定結果

上記のOCV法を使用し、成層化がある状態のバッテリーでSOCを推定した結果、車両を停止してから1h経過すれば、誤差2.5%以下のSOC推定精度を得られることがわかった (Fig.13)。これにより、OCV法が車両で十分に運用可能であることがわかった。

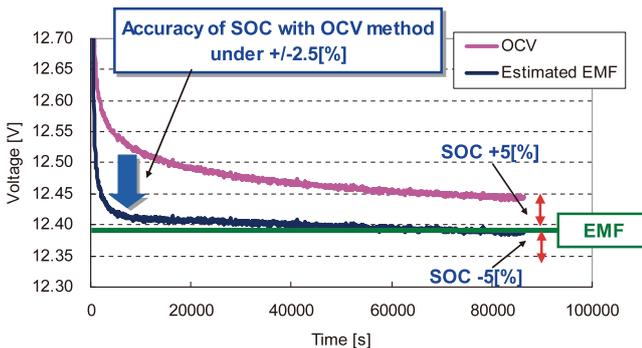


Fig.13 Result of the Estimated EMF

4.2 OCV法によるSOH, SOF推定

EMFを正確に推定できるようになったことで、SOF, SOH判定精度も向上できるようになった。

(1) SOF推定精度の向上

アイドリングストップ時は、電装品の消費電流に応じて、バッテリー電圧が低下する。i-stopでは、SOC管理とアイドリングストップ中の最低電圧の監視で電力供給の信頼性を確保している。今回、EMFを正確に推定することで、

式(5)のようにバッテリーの内部抵抗を知ることができる。

$$\text{内部抵抗} = (\text{バッテリー電圧} - \text{EMF}) / \text{バッテリー電流} \quad (5)$$

内部抵抗とEMFがわかることで、リアルタイムにアイドリングストップ時の最低電圧を予測することができるようになった (Fig.14)。これにより、アイドリングストップ時の電力供給の信頼性を大幅に向上できる。

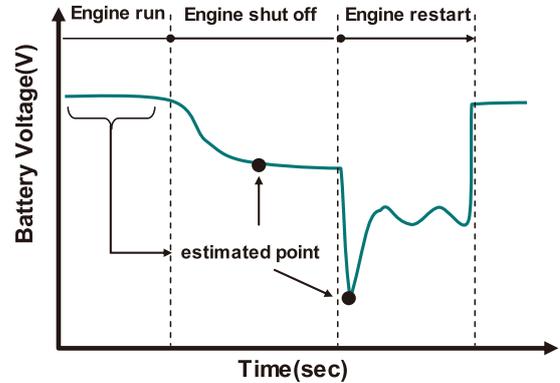


Fig.14 SOF Estimation with EMF and Internal Resistance

(2) SOH推定精度の向上

アイドリングストップ時に電圧が下がる原因は、バッテリー劣化や分極以外にも、車の長期放置やライト消し忘れに等による放電、車両の消費電流の増加、温度による電気抵抗変化などがある。これらの電圧低下要因を細かく判定し、適切な処理を行うことで、バッテリーを限界まで使うことができるようになった (Table 1)。

Table 1 Causes and Solutions of Low Voltage

monitor	cause judgment	solution
Low EMF	Low SOC	auxiliary charge
	Sulfation	inhibit i-stop
Internal resistance increase	Low SOC	auxiliary charge
	Corrosion	inhibit i-stop
	Battery temperature	pause i-stop
	Active material loss	inhibit i-stop
Current increase	electrical equipment	pause i-stop

5. さいごに

今回開発したOCV法により、高精度にSOCを推定できるようになった。これにより、オルタネータ減速回生とアイドリングストップの両立が可能となった。また、SOF推定、SOH推定の精度向上により、アイドリングストップの信頼性も向上できるようになった。今後は、本技術を次世代の車に展開していく。

参考文献

- (1) 西里ほか：バッテリーマネジメントによる燃費改善
マツダ技報No.25 (2007), p152-156
- (2) 猿渡ほか：マツダ i-STOP (アイ・ストップ)
マツダ技報No.27 (2009), p9-14
- (3) 電気化学便覧, p158

■ 著 者 ■



久米章友



庄司 明



吉田勝正



小谷和也



平野晴洋



福馬 勉



中野雄介