

State of Charge Estimation for Series-Connected Lithium Battery Pack Using Extended Kalman Filter

M. Esfahanian^{1*}, M. J. Esfandyari², V. Esfahanian², H. Nehzati², H. Miladi²

¹ Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

² Vehicle, Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The battery pack is one of the main components in electric vehicles which is usually composed of many cells connected in series. Battery state of charge estimation is one of the most important functions of the battery management system in electric vehicles. Due to the different manufacturing and operational conditions, all of the cells in a battery pack do not have the same states of charge and therefore, the cell and pack states of charge are not the same. This paper presents a method for battery pack state of charge estimation which benefits rather low computational cost as well as the high precision. First, the coulomb counting method and the open circuit voltage graph, which is obtained from the experimental results, are used simultaneously to estimate the pack average state of charge. Then, the extended Kalman filter method is used to estimate the difference between the pack average state of charge with those of the cells. The proposed method has been evaluated and verified using an experimental test bench for three series-connected lithium cells. Experimental test results indicate good performance of the proposed method in estimating the lithium battery pack state of charge.

Review History:

Received: 25 Nov. 2017

Revised: 22 Jan. 2018

Accepted: 11 Mar. 2018

Available Online: 18 Apr. 2018

Keywords:

Battery state of charge

Extended Kalman filter

Lithium battery pack

Battery management system

1- Introduction

The battery pack is one of the most important parts of Electric Vehicles (EVs) and Hybrid Electric Vehicles (HEVs) such that the vehicle performance during acceleration, regenerative braking, gradeability and all-electric range of these vehicles depends on the design of the battery system [1]. The Battery Management System (BMS) in EVs and HEVs is used for monitoring, management and protection of the batteries. One the key tasks of BMS is to estimate the battery pack State of Charge (SoC) which is an indicator of battery available energy [2-4]. This paper presents a method for estimation of a Lithium-ion battery pack SoC considering the differences between the cells. The proposed method has been evaluated and verified using an experimental setup containing three LiFePO₄ cells which are connected in series and the results approves the efficacy of the proposed SoC estimation method.

2- Battery Pack Mean SoC Estimation

In order to estimate the SOC for the cells in a battery pack, a mean model and mean SoC estimation of the pack is required. The mean model consists of an Equivalent Circuit Model (ECM) which describes the relation between the current and mean cell voltage of the pack. The ECM in this research consists of the open circuit voltage and a series resistance. In order to extract the parameters of the ECM,

*Corresponding author's email: mesf1964@cc.iut.ac.ir

discharge and charge pulses are applied to the cells.

The developed experimental test bench is shown in Fig. 1 which consists of three LiFePO₄ cells connected in series, BMS, relay and fuse for protection, shunt resistor for current measurement, discharge elements, power supply and a laptop computer capable of Controller Area Network (CAN) signal read for monitoring and storage of the test results. The pack mean open circuit voltage and internal resistance obtained from the charge and discharge pulses are depicted in Figs. 2 and 3.

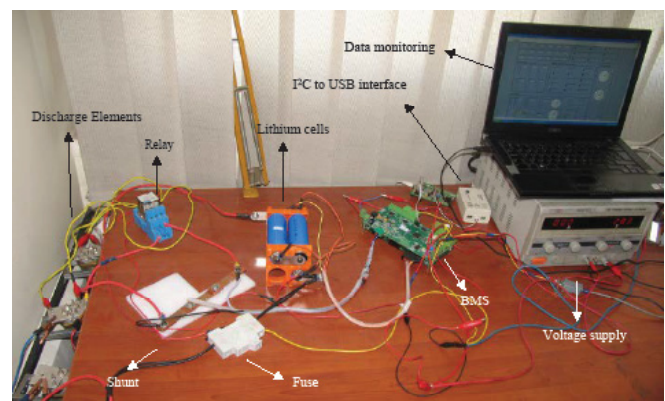


Fig. 1. Experimental test bench

To obtain the mean SoC for the pack, a combination of Coulomb counting method and the open circuit voltage is used. The estimated mean SoC during the discharge pulses is

presented in Fig. 4 which shows maximum error of 2%.

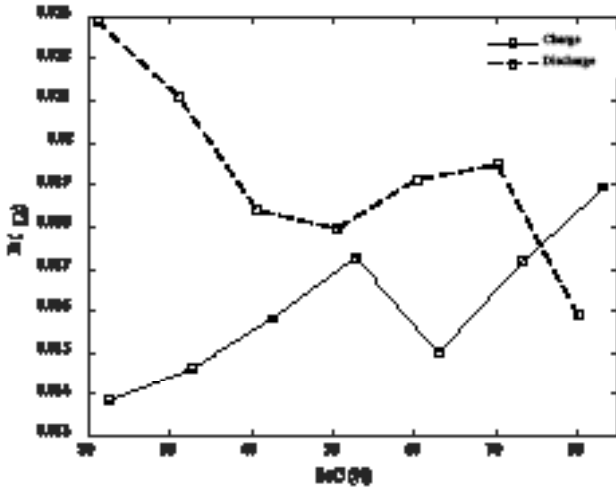


Fig. 2. Mean internal resistance vs. SoC

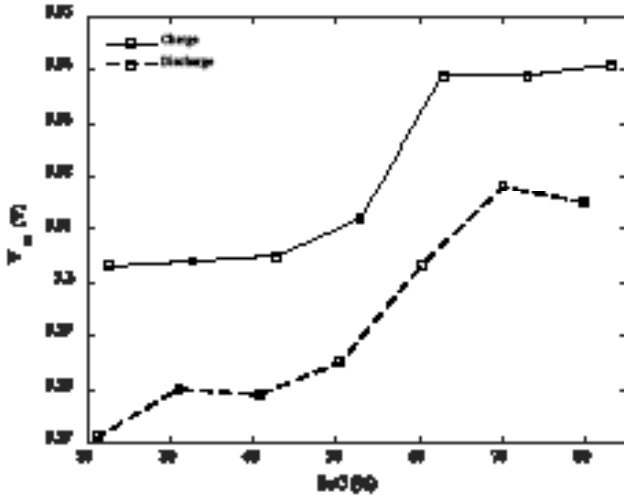


Fig. 3. Mean open circuit voltage vs. SoC

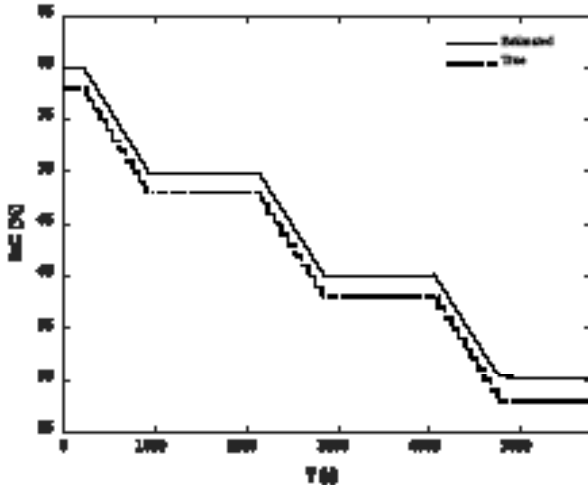


Fig. 4. Mean SOC during discharge pulses

3- Cell SoC Estimation Using Extended Kalman Filter

The Extended Kalman Filter (EKF) is a kind of Kalman filter which is used for estimation of the states or parameters in nonlinear systems. The EKF is applied for estimation of

the SoC difference between the individual cells and the mean SoC of the pack. The formulation of EKF for state estimation is given in Table 1.

Table 1. EKF formulation

*Model	$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$ $y_k = g(x_k, u_k) + e_k$
Definitions	$A_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x_{k-1}} \right _{x_{k-1} = \hat{x}_{k-1}^+}$ $C_k = \left. \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right _{x_k = \hat{x}_k^-}$
Initial values	$\hat{x}_0^+ = E[x_0]$ $P_0 = E[(x_0 - x_0^+)(x_0 - x_0^+)^T]$
Calculations	1. $\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$ 2. $S_k^- = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + \Sigma_w$ 3. $L_k = S_k^- C_k^T [C_k S_k^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1}$ 4. $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k))$ 5. $P_k = (I - L_k C_k) S_k^-$

*Parameters w_k and e_k are independent zero-mean Gaussian noises with variances Σ_w and Σ_e .

The state space equation used for estimation of the cells' SoC is given by Eqs. (1) and (2).

$$\begin{cases} \Delta R_k^i = \Delta R_{k-1}^i + w_k^R \\ v_k^i = V_{oc}(\bar{z}_k + \Delta z_k^i) - (\bar{R}_k + \Delta R_k^i) i_k + e_k \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta z_k^i = \Delta z_{k-1}^i + w_k^z \\ v_k^i = V_{oc}(\bar{z}_k + \Delta z_k^i) - (\bar{R}_k + \Delta R_k^i) i_k + e_k \end{cases} \quad (2)$$

where Δz_k^i and ΔR_k^i are the difference between the SoC and internal resistance of the i th cell with the mean SOC and internal resistance of the pack, respectively, and w_k^z and w_k^R are zero-mean Gaussian noises. Since the differences between the mean and actual values of the SoC are low, it is possible to increase the time step of the estimation process to reduce the computational cost. Using the estimated states of the above system, the SoC and internal resistance of the cells can be calculated using the following equations:

$$\begin{cases} z^i = \bar{z} + \Delta z^i \\ R^i = \bar{R} + \Delta R^i \end{cases} \quad (3)$$

4- Results

In this section, the mean SoC and internal resistance are calculated using the approach explained in section 2 and the estimation is combined with the estimation based on the EKF to obtain the SoC for the pack. The relevant parameters for simulation are given in Table 2.

Table 2. Relevant parameters used in the simulation

Variable	Parameter	Value
Capacity	Q	10Ah
Initial SoC difference	Δz_0^i	0
Initial resistance difference	ΔR_0^i	0.02Ω
System noise variance	w_k^z	1×10^{-10}
Measurement noise variance	e_k	1×10^{-10}
System noise variance	w_k^R	1×10^{-10}
Initial value of the covariance matrix	P_0	10^5

The actual cell voltages and the estimation results are shown in Figs. 5 and 6. The maximum error of 3% is achieved in SoC estimation of the cells.

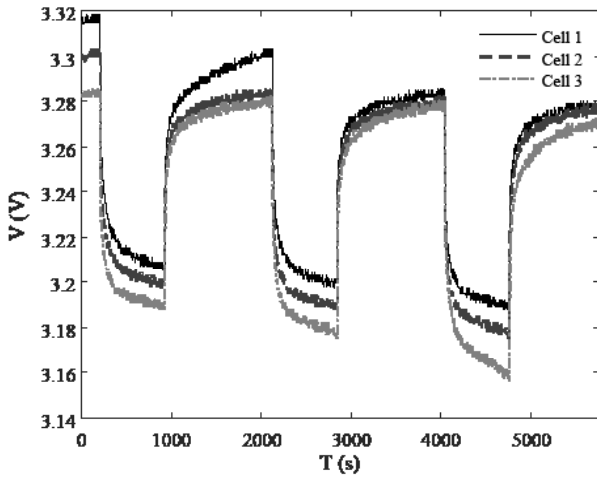


Fig. 5. Actual cell voltages

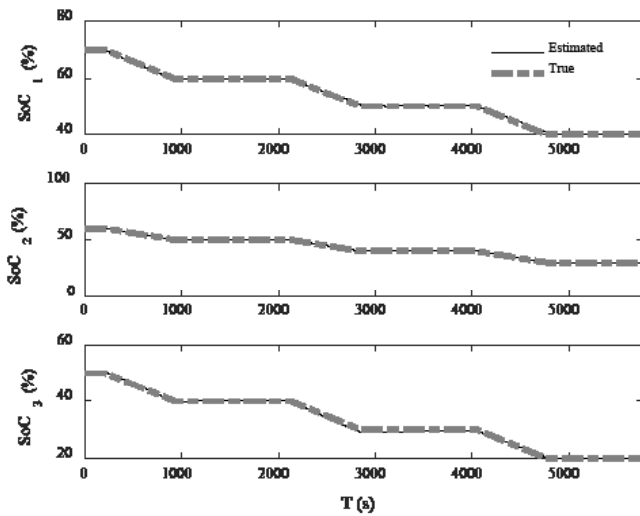


Fig. 6. SoC estimation results

5- Conclusion

In this paper, a SoC estimation method is presented for a battery pack containing series-connected cells. Using a combination of Coulomb counting method and the open circuit voltage the pack mean SoC is estimated. In addition, an EKF-based method is developed for estimation of the SoC deviations from the mean values. Experimental and simulation results approve the efficacy of the proposed estimation method.

6- References

- [1] M. J. Esfandyari, M. Esfahanian, M. R. H. Yazdi, V. Esfahanian, H. Nehzati, and A. Salehi, "Hardware-in-the-loop simulation for verification of the drive motor management software in a series hybrid electric bus," *Int. J. Powertrains*, vol. 6, no. 2, pp. 184–199, 2017.
- [2] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. May, pp. 834–854, 2017.
- [3] G. L. Plett, "Efficient Battery Pack State Estimation using Bar-Delta Filtering," *Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp.*, pp. 1–8, 2009.
- [4] W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 321–339, 2014.



تخمین سطح شارژ مجموعه سلول لیتیومی با اتصال سری با استفاده از فیلتر کالمن تعمیر یافته

محسن اصفهانیان^{۱*}، محمدجواد اسفندیاری^۲، وحید اصفهانیان^۳، حسن نهضتی^۴، حداد میلادی^۵

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
^۲پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹

کلمات کلیدی:

سطح شارژ باتری
فیلتر کالمن تعمیر یافته
پک باتری لیتیومی
سیستم مدیریت باتری

خلاصه: مجموعه باتری یکی از اجزای اصلی در خودروهای الکتریکی است که به طور معمول از مجموعه‌ای از سلول‌های باتری تشکیل شده است که به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند. یکی از مهمترین وظایف سیستم مدیریت باتری در خودروهای الکتریکی تخمین سطح شارژ مجموعه باتری است. سلول‌های موجود در یک پک باتری بدلیل تفرانس‌های مختلف ساخت و شرایط مختلف عملکردی الزاماً سطح شارژ یکسانی ندارند و از این رو، سطح شارژ مجموعه باتری الزاماً با سطح شارژ سلولها یکسان نیست. این مقاله به ارائه روشی برای تخمین سطح شارژ مجموعه باتری می‌پردازد که در کنار دقت بالا، هزینه محاسباتی نسبتاً پایینی دارد. ابتدا از روش شمارش کولمب و منحنی ولتاژ مدار باز باتری که از داده‌های تجربی استخراج شده است، به طور همزمان برای تخمین سطح شارژ میانگین مجموعه باتری استفاده شده است. سپس با استفاده از فیلتر کالمن تعمیر یافته، اختلاف سطح شارژ بین هر کدام از سلول‌ها و سطح شارژ میانگین تخمین زده شده است. روش پیشنهادی بوسیله یک بستر تست تجربی و برای مجموعه‌ای متشکل از سه سلول باتری لیتیومی که به شکل سری متصل شده‌اند مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گرفته است. نتایج تست‌های تجربی حاکی از عملکرد مناسب روش پیشنهادی در تخمین سطح شارژ پک باتری لیتیومی می‌باشد.

۱- مقدمه

مجموعه باتری یکی از مهمترین اجزا در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی است بطوریکه عملکرد خودرو در شتاب‌گیری، ترمز باز یاب، شیب‌پیمایی و میزان پیمایش مسافت تمام برقی ارتباط تنگاتنگی با نوع و ساختار باتری دارد. باتری‌های لیتیومی بدلیل چگالی انرژی و چگالی توان بالایی که دارند یکی از بهترین کاندیدها برای سیستم ذخیره انرژی در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی هستند. سیستم مدیریت باتری در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی وظیفه مانیتورینگ، مدیریت و حفاظت مجموعه باتری را بر عهده دارد. یکی از مهمترین وظایف سیستم مدیریت باتری تخمین و گزارش سطح شارژ باتری است که معرف میزان انرژی الکتریکی موجود در باتری است. اطلاع از میزان شارژ موجود در مجموعه باتری در خودروی الکتریکی برای راننده به منظور اتخاذ تدابیر مناسب ضروری است. همچنین، با دانستن سطح شارژ باتری در خودروی هیبرید الکتریکی واحد کنترل مرکزی خودرو قادر است روشن و یا خاموش شدن مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور را مدیریت

کند [۱-۳].

روش‌های مختلفی برای تخمین سطح شارژ باتری ارائه شده است. یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها انجام تست تخلیه با شرایط کنترل شده (نرخ تخلیه و دما) است. این روش دقت بسیار بالایی دارد اما نیازمند زمان طولانی است و بدلیل عدم ارائه تخمین به صورت برخط قابلیت استفاده در کاربرد خودرویی را ندارد [۴]. روش شمارش کولمب یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای محاسبه سطح شارژ باتری است که در آن از انتگرال جریان برای گزارش سطح شارژ باتری استفاده می‌شود [۵ و ۶]. در این روش مقدار اولیه سطح شارژ و ظرفیت باتری باید معلوم باشد. روش دیگر استفاده از ولتاژ مدار باز باتری است که در آن با استفاده از منحنی‌های ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ که در شرایط محیطی مختلف و در محیط آزمایشگاهی استخراج می‌شود می‌توان به تخمینی از سطح شارژ باتری دست یافت. این روش در حین شارژ و تخلیه قابل استفاده نیست و فقط در حالت استراحت قابل استفاده است [۷ و ۸].

از دیگر روش‌های تخمین سطح شارژ باتری استفاده از مدل باتری برای برقراری رابطه بین ولتاژ، جریان و دمای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسورها با

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mesf1964@cc.iut.ac.ir

تخمین سطح شارژ مجموعه‌ای متشکل از دو سلول باتری لیتیوم فسفات آهن استفاده شده است که برای محدوده خاصی از سطح شارژ قابل استفاده است و برای هر شیمی از سلول لیتیومی کارایی ندارد.

در این مقاله از دو الگوریتم برای تخمین سطح شارژ سلول‌ها در یک مجموعه باتری استفاده شده است. در الگوریتم اول، از روش شمارش کولمب و همچنین منحنی ولتاژ مدار باز باتری به طور همزمان برای تخمین سطح شارژ میانگین مجموعه باتری استفاده شده است. در نتیجه استفاده همزمان از این دو روش می‌توان معایب هر کدام را بوسیله دیگری پوشش داد و از مزایای هر دو نیز استفاده کرد. در الگوریتم دوم از فیلتر کالمن تعمیم‌یافته برای تخمین اختلاف سطح شارژ بین هر کدام از سلول‌ها و سطح شارژ میانگین مجموعه استفاده شده است. در کنار هزینه محاسباتی پایین الگوریتم اول، با توجه به اینکه اختلاف سطح شارژ بین سلول‌ها با سطح شارژ میانگین کم است، الگوریتم دوم را می‌توان در تکرارهای بسیار کمتری نسبت به الگوریتم اول اجرا کرد و بنابراین در مجموع می‌توان بار محاسباتی را به شدت کاهش داد.

روش پیشنهادی بوسیله یک بستر تست تجربی و برای مجموعه‌ای متشکل از سه سلول باتری لیتیومی که به شکل سری متصل شده‌اند مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گرفته است. نتایج تست‌های تجربی حاکی از عملکرد مناسب راهکار پیشنهادی در تخمین سطح شارژ یک باتری لیتیومی می‌باشد. در قسمت ۲ الگوریتم تخمین سطح شارژ میانگین و در قسمت ۳ الگوریتم تخمین سطح شارژ سلول‌ها تشریح شده‌اند. در قسمت ۴ نیز نتایج شبیه‌سازی و تست‌های تجربی ارائه شده است.

۲- تخمین سطح شارژ میانگین برای یک باتری

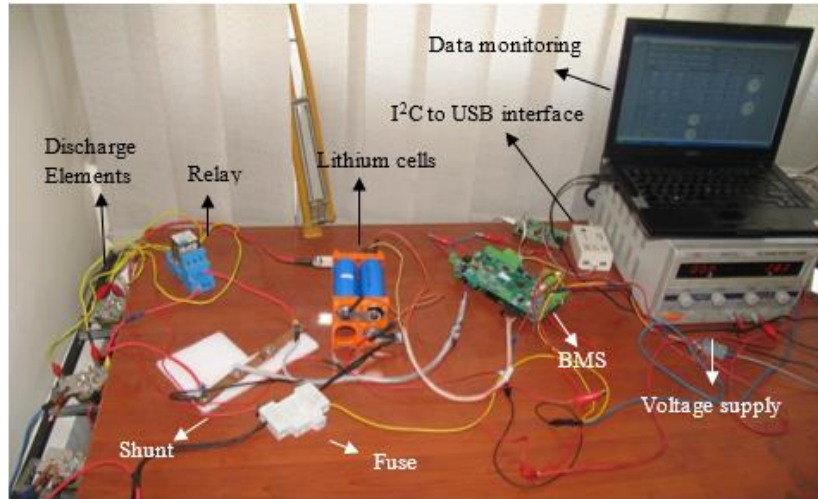
به‌منظور تخمین سطح شارژ سلول‌ها در یک یک باتری، ابتدا یک مدل میانگین و یک تخمین سطح شارژ میانگین برای یک باتری نیاز است. مدل میانگین عبارت است از یک مدل مدار معادل که رابطه بین جریان و ولتاژ میانگین سلول‌ها را شبیه‌سازی می‌کند و سطح شارژ میانگین عبارت است از میانگین سطح شارژ تمامی سلول‌ها که در قسمت‌های بعد هر کدام به تفکیک ارائه خواهد شد.

۲-۱- مدل مدار معادل میانگین برای مجموعه باتری

مدل مدار معادل مورد استفاده متشکل از ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی سری است. برای این مدل ولتاژ ترمینال میانگین مجموعه باتری در رابطه (۱) آمده است.

سطح شارژ باتری است که مدل مدار معادل باتری بدلیل هزینه محاسباتی پایین‌تر نسبت به مدل الکتروشیمی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۰]. در این روش بر اساس اطلاعات سنسورها مقدار ولتاژ مدار باز باتری تخمین زده می‌شود و با استفاده از رابطه بین ولتاژ مدار باز و سطح شارژ باتری، تخمینی از سطح شارژ بدست می‌آید. ضعف عمده روش‌های مبتنی بر مدل برای تخمین سطح شارژ باتری وابستگی دقت تخمین به دقت مدل‌سازی باتری است. روش دیگر، استفاده از شبکه عصبی برای تخمین سطح شارژ باتری است. در این روش به جای استفاده از مدل مدار معادل از شبکه عصبی تربیت شده برای تخمین سطح شارژ باتری استفاده می‌شود [۱۱ و ۱۲]. دستیابی به تخمین مناسب در استفاده از شبکه عصبی نیازمند حجم عظیم داده در شرایط مختلف عملکردی و هزینه محاسباتی بالا است. همچنین، روش‌های مبتنی بر منطق فازی برای تخمین سطح شارژ باتری ارائه شده است که نیازمند دانش وسیع نسبت به شرایط مختلف عملکردی باتری و هزینه محاسباتی بالا است [۱۳].

در پژوهش‌های فوق‌الذکر، تخمین سطح شارژ برای سلول باتری ارائه شده است. در خودروی الکتریکی و هیبرید الکتریکی مجموعه‌ای از سلول‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل هستند و تشکیل یک باتری را می‌دهند. تمامی سلول‌های موجود در یک یک باتری الزاماً سطح شارژ یکسانی ندارند که این عمدتاً بدلیل تفرانس‌های مختلف ساخت و شرایط مختلف عملکردی سلول‌ها است که منجر به نامتوازن شدن ولتاژ و سطح شارژ آن‌ها می‌شود. یک راهکار برای تخمین سطح شارژ یک باتری استفاده موازی از روش‌های سلول-مینا برای همه سلول‌ها است. با توجه به اینکه در یک یک باتری ممکن است بیش از صدها سلول باتری وجود داشته باشد، تخمین سطح شارژ تمامی سلول‌ها هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد و عملاً بسیار دشوار است [۱۴]. روش‌هایی با هزینه محاسباتی کمتر در این رابطه ارائه شده است. از جمله، در مراجع [۱۵ و ۱۶] از رویکرد لونی‌گر برای تخمین سطح شارژ میانگین برای یک استفاده شده است و با استفاده از محاسبات ریاضی ساده اختلاف سطح شارژ سلول‌ها با سطح شارژ میانگین یک استخراج شده است. در مرجع [۱۷] یک مدل میانگین برای یک باتری استخراج شده است و تخمین سطح شارژ سلول‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات و با توجه به اختلاف ولتاژ بین سلول‌ها و مدل میانگین انجام شده است. ضعف عمده این پژوهش منحصر کردن قابلیت تخمین در سطح شارژ نزدیک ۳۰ درصد است. به عبارت دیگر برای دستیابی به تخمین مناسب باید سطح شارژ مجموعه باتری به نزدیک ۳۰ درصد برسد که این در حین سیکل حرکتی خودروی الکتریکی و هیبرید الکتریکی ممکن است اتفاق نیفتد. در مرجع [۱۸]، فقط از ولتاژ یک باتری و نه تک‌تک سلول‌ها برای



شکل ۱: میز تست تجربی

Fig. 1. Experimental test bench

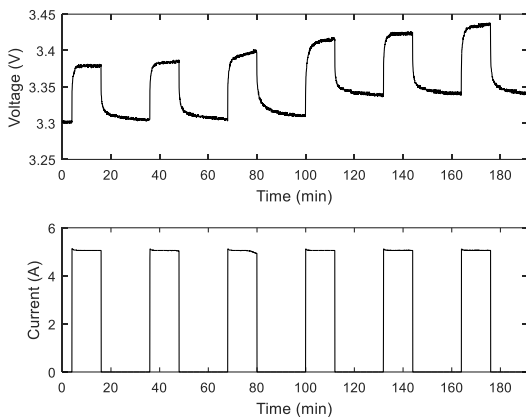
شارژ و تخلیه و منحنی ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی میانگین در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده‌اند. نحوه استخراج منحنی ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی بر حسب سطح شارژ با استفاده از پالس‌های جریان روی باتری در مرجع [۱۹] آمده است.

۲-۲- سطح شارژ میانگین برای مجموعه باتری

برای بدست آوردن سطح شارژ میانگین مجموعه باتری از یک تراشه شرکت تگزاس اینسترومنت به نام BQ۳۴Z۱۰۰-G۱ استفاده شده است که در سیستم مدیریت باتری مورد استفاده قرار گرفته است. این تراشه از ترکیب دو روش شمارش کولمب و منحنی ولتاژ مدار باز باتری برای تخمین سطح شارژ میانگین پک استفاده می‌کند. ارتباط با این تراشه از طریق پروتکل سریال مدار درون-یکپارچه انجام می‌شود که بوسیله آن، تنظیمات

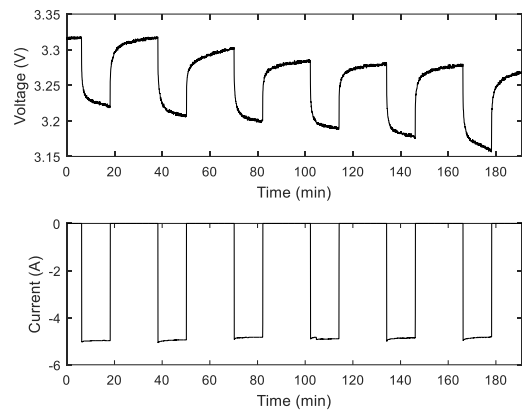
$$\bar{V}_t = \bar{V}_0(\bar{z}) - \bar{R}(\bar{z}).i \quad (1)$$

در رابطه (۱)، \bar{V}_0 و \bar{R} و \bar{z} به ترتیب ولتاژ مدار باز، مقاومت داخلی میانگین و سطح شارژ نرمالیزه میانگین مجموعه باتری هستند. به منظور استخراج پارامترهای مدل مدار معادل میانگین، از پالس‌های تخلیه و شارژ در طول یک سیکل تخلیه و شارژ برای مجموعه باتری استفاده شده است. میز تست مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است که متشکل از سه سلول باتری لیتیومی سری با کاتد فسفات آهن (LiFePO_4)، سیستم مدیریت باتری، رله و فیوز حفاظت، شانت برای قرائت جریان، المنت برای تخلیه باتری، لپ‌تاپ متصل به شبکه ارتباطی برای مانیتورینگ و ذخیره اطلاعات پک باتری و منبع ولتاژ می‌باشد. ظرفیت سلول مورد استفاده ۱۰ آمپر ساعت و ولتاژ نامی آن ۳/۲ ولت است. ولتاژ میانگین برای مجموعه باتری در حین



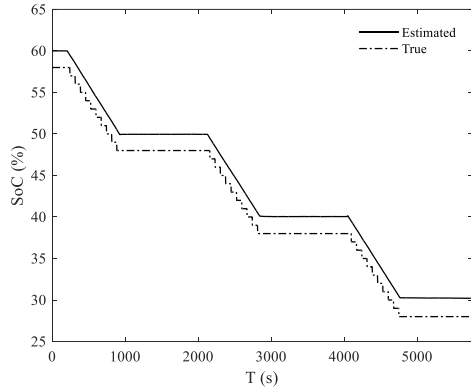
شکل ۳: ولتاژ میانگین و جریان حین شارژ

Fig. 3. Mean voltage and current during charge



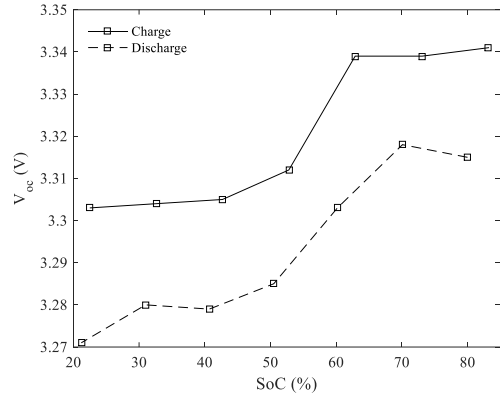
شکل ۲: ولتاژ میانگین و جریان حین تخلیه

Fig. 2. Mean voltage and current during discharge



شکل ۶: سطح شارژ میانگین پک حین پالس‌های تخلیه

Fig. 6. Pack mean state of charge during discharge pulses



شکل ۴: ولتاژ مدار باز میانگین بر حسب سطح شارژ

Fig. 4. Mean open circuit voltage versus state of charge

Table 1. Extended Kalman Filter formulation

جدول ۱: فرمولاسیون فیلتر کالمن تعمیم‌یافته

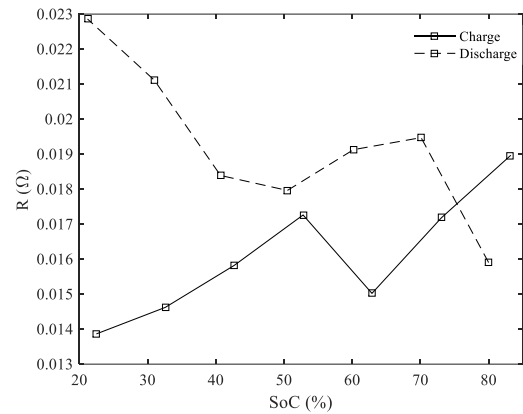
$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$	مدل *
$y_k = g(x_k, u_k) + e_k$	
$A_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x_{k-1}} \right _{x_{k-1} = \hat{x}_{k-1}^+}$	تعاریف
$C_k = \left. \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right _{x_k = \hat{x}_k^-}$	
$\hat{x}_0^+ = E[x_0]$	مقادیر اولیه
$P_0 = E[(x_0 - x_0^+)(x_0 - x_0^+)^T]$	
1. $\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$	
2. $S_k^- = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + \Sigma_w$	
3. $L_k = S_k^- C_k^T [C_k S_k^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1}$	محاسبات
4. $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k))$	
5. $P_k = (I - L_k C_k) S_k^-$	

* پارامترهای w_k و e_k نویزهای گوسی میانگین صفر مستقل با واریانس‌های Σ_w و Σ_e هستند.

۳- تخمین سطح شارژ سلول‌ها بوسیله فیلتر کالمن تعمیم یافته

فیلتر کالمن تعمیم یافته نوعی از فیلتر کالمن است که برای تخمین متغیرهای حالت یا پارامترهای سیستم‌های غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مراحل تخمین متغیرهای حالت با استفاده از روش فیلتر کالمن تعمیم‌یافته در جدول ۱ آمده است. مدل در نظر گرفته شده برای هر سلول مشابه حالت قبل از ولتاژ مدار باز به همراه مقاومت داخلی سری تشکیل می‌شود (رابطه (۲)).

$$v_k = V_{oc}(z_k) - R(z_k) i_k \quad (2)$$



شکل ۵: مقاومت داخلی میانگین بر حسب سطح شارژ

Fig. 5. Mean internal resistance versus state of charge

اولیه تراشه و قرائت اطلاعات اعم از سطح شارژ، جریان و ولتاژ مجموعه باتری صورت می‌پذیرد. استخراج اطلاعات مجموعه باتری توسط تراشه بوسیله حداقل دو سیکل آموزشی شارژ و تخلیه کامل با شرایط مشخص شده توسط سازنده انجام می‌شود. با انجام سیکل‌های آموزش، کاربر می‌تواند اطلاعات مستخرج از آن را در فایل ذخیره کرده و برای مجموعه باتری با مشخصات مشابه مورد استفاده قرار دهد.

نتایج تخمین سطح شارژ میانگین مجموعه باتری بوسیله تراشه BQ34Z100-G1 در حین انجام پالس‌های تخلیه در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار سطح شارژ اولیه در این تراشه با استفاده از منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ تخمین زده می‌شود. با توجه به اینکه منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ برای سلول مورد استفاده گستره تغییرات کمی دارد (شکل ۴)، خطای تقریباً ثابت ۲ درصد در تخمین ناشی از خطای تخمین مقدار اولیه سطح شارژ است.

Table 3. Values of the parameters used in simulation

مقدار	پارامتر	متغیر
۱۰ آمپرساعت	Q	ظرفیت
صفر	Δz_0^i	مقدار اولیه اختلاف سطح شارژ
۰/۰۲ اهم	ΔR_0^i	مقدار اولیه اختلاف مقاومت داخلی
1×10^{-10}	w_k^-	واریانس نویز سیستم در رابطه (۴)
1×10^{-10}	e_k	واریانس نویز اندازه گیری در روابط (۴) و (۵)
1×10^{-10}	w_k^R	واریانس نویز سیستم در رابطه (۵)
10^5	P_0	مقدار اولیه ماتریس کوواریانس

جدول ۳: مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

استخراج شده‌اند که در جدول ۲ آمده‌اند.

$$V_{oc}(z) = \alpha_0 + \alpha_1 z + \alpha_2 z^2 + \alpha_3 z^3 + \frac{\alpha_4}{z} + \alpha_5 \ln(z) + \alpha_6 \ln(1-z) \quad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶)، ماتریسهای A_{k-1} و C_k در فیلتر کالمن تعمیم‌یافته برای معادلات فضای حالت (رابطه‌های (۴) و (۵)) محاسبه می‌شود که در رابطه‌های (۷) و (۸) آمده است.

$$\begin{cases} A_{k-1} = \frac{\partial f}{\partial \Delta z_{k-1}^i} = 1 \\ C_k = \frac{\partial g}{\partial \Delta z_k^i} = \alpha_1 + 2\alpha_2(\bar{z}_k + \Delta z_k^i) + 3\alpha_3(\bar{z}_k + \Delta z_k^i)^2 - \frac{\alpha_4}{(\bar{z}_k + \Delta z_k^i)^2} + \frac{\alpha_5}{\bar{z}_k + \Delta z_k^i} - \frac{\alpha_6}{1 - (\bar{z}_k + \Delta z_k^i)} \end{cases} \quad (۷)$$

$$\begin{cases} A_{k-1} = \frac{\partial f}{\partial \Delta R_{k-1}^i} = 1 \\ C_k = \frac{\partial g}{\partial \Delta R_k^i} = -i_k \end{cases} \quad (۸)$$

با تخمین پارامترهای Δz^i و ΔR^i برای هر سلول بوسیله فیلتر کالمن تعمیم‌یافته و با استفاده از تخمین مقادیر میانگین \bar{z} و \bar{R} حاصل از تراشه BQ۳۴Z۱۰۰-G۱ که در قسمت قبل ارایه شد، مقادیر سطح شارژ و مقاومت داخلی برای هر سلول از رابطه (۹) بدست می‌آیند. نتایج حاصل از تخمین در قسمت بعد آمده است.

$$\begin{cases} z^i = \bar{z} + \Delta z^i \\ R^i = \bar{R} + \Delta R^i \end{cases} \quad (۹)$$

۴- نتایج

در این قسمت، مقادیر میانگین سطح شارژ و مقاومت داخلی با استفاده از تراشه BQ۳۴Z۱۰۰-G۱ محاسبه شده و تخمین حاصل از آن با تخمین

Table 2. Open circuit voltage versus SoC curve fitting results

ضریب	مقدار	ضریب	مقدار
α_0	۴/۹۱۴	α_4	۰/۰۱۹۵۶
α_1	-۴/۴۵۷	α_5	۰/۶۵۳۸
α_2	۵/۱۲۳	α_6	-۰/۰۸۵۵۵
α_3	-۲/۵۸۸		

جدول ۲: نتایج برازش منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ

$$z_k = z_{k-1} - i_{k-1} \Delta t Q^{-1} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، Z_k سطح شارژ سلول، Δt گام زمانی و Q ظرفیت سلول است. برای تخمین سطح شارژ هر سلول از سیستم‌های فضای حالتی به فرم رابطه‌های (۴) و (۵) استفاده شده است که هر کدام دارای یک متغیر حالت و یک خروجی است.

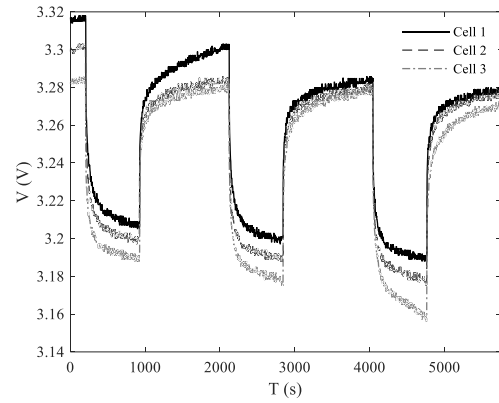
$$\begin{cases} \Delta z_k^i = \Delta z_{k-1}^i + w_k^- \\ v_k^i = V_{oc}(\bar{z}_k + \Delta z_k^i) - (\bar{R}_k + \Delta R_k^i) i_k + e_k \end{cases} \quad (۴)$$

$$\begin{cases} \Delta R_k^i = \Delta R_{k-1}^i + w_k^R \\ v_k^i = V_{oc}(\bar{z}_k + \Delta z_k^i) - (\bar{R}_k + \Delta R_k^i) i_k + e_k \end{cases} \quad (۵)$$

در رابطه‌های (۴) و (۵)، Δz_k^i معرف اختلاف سطح شارژ سلول i ام با سطح شارژ میانگین در لحظه k ، w_k^- نویز گوسی میانگین صفر، ΔR_k^i اختلاف مقاومت داخلی سلول i ام با مقاومت داخلی میانگین در لحظه k و e_k نویز گوسی میانگین صفر می‌باشند. در رابطه (۴)، Δz_k^i متغیر حالت، i_k ورودی و v_k^i خروجی معادله حالت و در رابطه (۵)، ΔR_k^i متغیر حالت، i_k ورودی و v_k^i خروجی معادله حالت می‌باشند. با توجه به اینکه اختلاف سطح شارژ و مقاومت داخلی با مقادیر میانگین تغییرات زیادی ندارند می‌توان تکرر اجرای تخمین را هنگام پیاده‌سازی در سیستم مدیریت باتری کاهش داد که نتیجتاً هزینه محاسباتی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، معادلات فضای حالت ارایه شده دارای تنها یک متغیر حالت هستند که این مهم نیز منجر به هزینه محاسباتی پایین در روش مورد استفاده می‌شود.

به‌منظور استفاده از فیلتر کالمن تعمیم‌یافته، لازم است مقدار ولتاژ مدار باز باتری با استفاده از یک رابطه ریاضی بیان شود. از این‌رو، از رابطه (۶) برای بیان رابطه بین ولتاژ مدار باز و سطح شارژ باتری استفاده شده است [۲۰]. ضرایب این رابطه با استفاده از افزونه برازش منحنی در نرم‌افزار متلب

با توجه به اینکه جریان یکسانی از هر سه سلول عبور می‌کند، اختلاف ولتاژ بین سلول‌ها حاکی از اختلاف بین سطح شارژ و مقاومت داخلی آن‌ها است. نتایج تخمین سطح شارژ و مقاومت داخلی سلول‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ آمده است. مقدار واقعی سطح شارژ اولیه سلول‌ها به ترتیب برابر ۷۰، ۶۰ و ۵۰ درصد است. همچنین مقدار اولیه اختلاف سطح شارژ با مقدار میانگین طبق جدول ۳ برابر با صفر در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از همگرایی سریع تخمین سطح شارژ به مقادیر واقعی است. با توجه به مقادیر بدست آمده می‌توان سطح شارژ واقعی پک باتری را معادل حداقل سطح شارژ در بین سلول‌ها در هر لحظه گزارش کرد که همان سطح شارژ سلول سوم است. خطای تخمین سطح شارژ سلول‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است که حداکثر برابر با ۱ درصد است. البته باید توجه داشت که این خطای تخمین نسبت به مقدار تخمین میانگین است. با توجه به وجود خطای تخمین ۲ درصد در تخمین سطح شارژ میانگین پک باتری مطابق شکل ۶، در مجموع حداکثر خطای تخمین سطح شارژ سلول‌ها برابر ۳ درصد است. نتایج تخمین مقاومت داخلی سلول‌ها در شکل ۹ و خطای تخمین در شکل ۱۰ نشان داده شده است. حداکثر خطای مطابق شکل ۱۰ برابر ۰/۵ میلی‌اوم است. مقایسه نتایج بدست آمده از تخمین با نتایج واقعی نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در تخمین سطح شارژ سلول‌ها و در نتیجه سطح شارژ واقعی یک پک باتری متشکل از سلول‌های سری است.

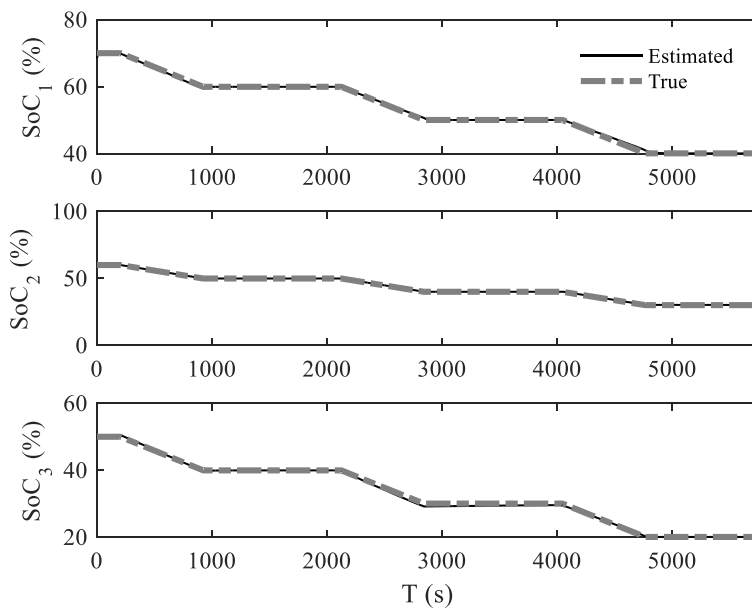


شکل ۷: ولتاژ اندازه‌گیری شده سلول‌ها

Fig. 7. Measured cell voltages

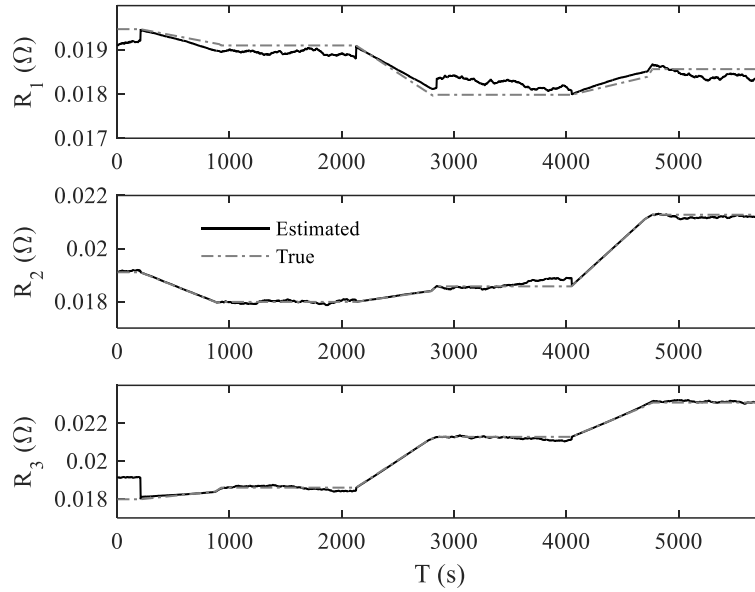
حاصل از روش فیلتر کالمن تعمیم‌یافته ترکیب شده و مقادیر سطح شارژ و مقاومت داخلی برای هر سلول حین انجام پالس‌های تخلیه تخمین زده شده است.

اطلاعات مربوط به پک باتری اعم از سطح شارژ میانگین، جریان و ولتاژ همه سلول‌ها از طریق پروتکل شبکه ارتباطی از سیستم مدیریت باتری دریافت می‌شود. مانیتورینگ اطلاعات دریافتی از شبکه ارتباطی و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم تخمین سطح شارژ سلول‌ها در محیط نرم‌افزار لَب‌ویو انجام شده است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است. منحنی تغییرات ولتاژ سلول‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



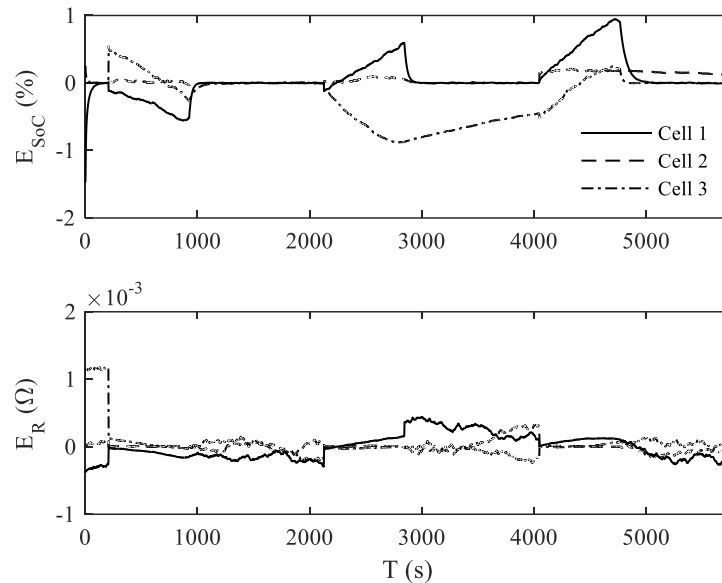
شکل ۸: سطح شارژ سلول‌ها

Fig. 8. Cells' states of charge



شکل ۹: مقاومت داخلی سلول‌ها

Fig. 9. Cells' internal resistance



شکل ۱۰: خطای تخمین

Fig. 10. Estimation error

۵- نتیجه‌گیری

بدلیل تغییرات ناچیز مقادیر ولتاژ مدار باز در سطح شارژهای مختلف برای سلول مورد استفاده است. برای تخمین سطح شارژ سلول‌ها از روش فیلتر کالمن تعمیم یافته استفاده شده است. نتایج تخمین با نتایج حاصل از تست‌های تجربی مقایسه شده است که حاکی از کارایی روش پیشنهادی در تخمین سطح شارژ سلول‌ها در یک مجموعه باتری است.

در این مقاله روشی برای تخمین سطح شارژ سلول‌های موجود در یک مجموعه باتری متشکل از چندین سلول سری ارائه شده است. برای تخمین سطح شارژ میانگین یک باتری از ترکیبی از روش‌های شمارش کولمب و منحنی ولتاژ مدار باز باتری بر حسب سطح شارژ استفاده شده است. خطای حداکثر در تخمین سطح شارژ میانگین برابر ۲ درصد است که آن هم عمدتاً

Mechanical Engineering, vol. 14, no. 4, pp. 200-206, 2014.
(in Persian)

[4] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. May, pp. 834–854, 2017.

[5] W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 321–339, 2014.

[6] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, Mar. 2013.

[7] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, and B. Y. Liaw, "Capacity loss in rechargeable lithium cells during cycle life testing: The importance of determining state-of-charge," *J. Power Sources*, vol. 174, no. 2, pp. 1121–1125, 2007.

[8] V. Pop, H. J. Bergveld, J. H. G. O. het Veld, P. P. L. Regtien, D. Danilov, and P. H. L. Notten, "Modeling battery behavior for accurate state-of-charge indication," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 153, no. 11, pp. A2013–A2022, 2006.

[9] C. Speltino, D. Di Domenico, G. Fiengo, and A. Stefanopoulou, "Comparison of reduced order lithium-ion battery models for control applications," *Proc. 48th IEEE Conf. Decis. Control held jointly with 2009 28th Chinese Control Conf.*, pp. 3276–3281, 2009.

[10] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.

[11] F. Zhou, L. Wang, H. Lin, and Z. Lv, "High accuracy state-of-charge online estimation of EV/HEV lithium batteries

۶- فهرست علائم

E_R	خطای تخمین مقاومت داخلی (Ω)
E_z	خطای تخمین سطح شارژ (%)
P	ماتریس کوواریانس
\bar{V}_i	ولتاژ ترمینال باتری (V)

علائم یونانی

α	ضرایب رابطه ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ باتری (V)
----------	--

بالانویس‌ها

i	شمارنده سلول
-----	--------------

زیرنویس‌ها

k	لحظه زمانی گسسته
R	مقاومت داخلی
z	سطح شارژ نرمالیزه
oc	مدار باز

۷- تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله، از مجموعه پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست دانشگاه تهران و گروه پژوهشی خودرو و وسایل ریلی دانشگاه صنعتی اصفهان که بستر مناسبی جهت انجام این پژوهش فراهم آورده‌اند کمال تشکر و قدردانی رami نمایند.

منابع

- [1] V. Esfahanian, M. J. Esfandyari, M. R. Hairi Yazdi, H. Nehzati, "Design and Implementation of A Real-time Simulator for Hardware-in-the-Loop Testing of A Hybrid Electric Bus Central Control Unit," *FISITA World Automotive Congress*, Maastricht, Netherland, June 2014.
- [2] M. J. Esfandyari, V. Esfahanian, M. R. H. Yazdi, H. Nehzati, A. Salehi, "Design and Implementation of a Model-in-the-Loop Simulator for Verification of the Vehicle Control Software in a Series Hybrid Electric Bus," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 12, pp. 13-22, 2015. (in Persian)
- [3] M. J. Esfandyari, M. R. Ha'iri Yazdi, V. Esfahanian, H. Nehzati, "Design of a Real-time Simulator of the Engine-Generator for a Series Hybrid Electric Bus," *Modares*

- Systems,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 3, pp. 737–743, 2011.
- [17] Y. Zheng et al., “Cell state-of-charge inconsistency estimation for LiFePO₄ battery pack in hybrid electric vehicles using mean-difference model,” Appl. Energy, vol. 111, no. February, pp. 571–580, 2013.
- [18] X. Lin, a G. Stefanopoulou, Y. Li, and R. D. Anderson, “State of charge estimation of cells in series connection by using only the total voltage measurement,” Am. Control Conf. (ACC), 2013, no. Ccm, pp. 704–709, 2013.
- [19] T. Feng, L. Yang, X. Zhao, H. Zhang, and J. Qiang, “Online identification of lithium-ion battery parameters based on an improved equivalent-circuit model and its implementation on battery state-of-power prediction,” J. Power Sources, vol. 281, pp. 192–203, 2015.
- [20] F. Sun and R. Xiong, “A novel dual-scale cell state-of-charge estimation approach for series-connected battery pack used in electric vehicles,” J. Power Sources, vol. 274, pp. 582–594, 2015.
- based on Adaptive Wavelet Neural Network,” in ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, 2013, pp. 513–517.
- [12] W. Jian, X. Jiang, J. Zhang, Z. Xiang, and Y. Jian, “Comparison of SOC estimation performance with different training functions using neural network,” in Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2012 UKSim 14th International Conference on, 2012, pp. 459–463.
- [13] A. Zenati, P. Desprez, H. Razik, and S. Rael, “A methodology to assess the State of Health of lithium-ion batteries based on the battery’s parameters and a Fuzzy Logic System,” in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1–6.
- [14] G. L. Plett, “Efficient Battery Pack State Estimation using Bar-Delta Filtering,” Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp., pp. 1–8, 2009.
- [15] M.A. Roscher, “Zustandserkennung von LiFePO₄-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge,” Ph.D. thesis, RWTH Aachen University, 2010.
- [16] M. A. Roscher, S. Member, O. S. Bohlen, and D. U. Sauer, “Reliable State Estimation of Multicell Lithium-Ion Battery

