

بهینه سازی جریان شارژ باتری های سربی-اسیدی برای کاربرد در خودروهای هایبرید الکتریکی با استفاده از روش تندترین شیب

هدا صابری و فرزاد رجایی سلماسی

قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

farzad_rs@ieee.org

h.saberi@ece.ut.ac.ir

چکیده - در این مقاله روشی برای طراحی جریان شارژ بهینه برای باتری های سربی-اسیدی به کار رفته در خودروهای هایبرید الکتریکی پیشنهاد شده است. این روش از مدل باتری برای به دست آوردن جریان شارژ بهینه استفاده می کند. به دلیل غیرخطی بودن مدل، روش بهینه سازی غیرخطی تندترین شیب استفاده می شود. با استفاده از این روش می توان مدت زمان شارژ را کاهش و طول عمر باتری را بهبود بخشید. برای مقایسه روش ارائه شده با سایر روش های موجود، از فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین ظرفیت باتری به عنوان معیاری از وضعیت سلامت باتری استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با استفاده از جریان شارژ به دست آمده، در ۱۰۰ سیکل ابتدای شارژ، وضعیت سلامت باتری به میزان ۷.۵٪ نسبت به روش شارژ چند مرحله ای بهبود یافته است.

کلید واژه- باتری سربی اسیدی، تندترین شیب، فیلتر کالمن توسعه یافته، کنترل شارژ

۱- مقدمه

زمان لازم برای پر شدن ۲۰٪-۲۵٪ ظرفیت باقیمانده در مرحله ولتاژ ثابت، حدود سه برابر زمان شارژ جریان ثابت است [۲]. در مرجع [۲] از روش $FC-ASCC$ به جای مرحله ولتاژ ثابت برای کاهش زمان شارژ استفاده شده است. شارژر پیشنهادی جریان شارژ مناسب را به صورت تطبیقی برای باتری فراهم می کند. روش های دیگری برای کاهش بیشتر زمان شارژ پیشنهاد شده است. این روش ها شامل الگوریتم منطقی چهار حالت [۳]، الگوریتم شارژ پالسی [۴] و کنترلر جریان چند سطحی تطبیقی است. هر چند با استفاده از این روش ها زمان شارژ کمتر به دست می آید، ولی چون الگوی شارژ فقط بر مبنای مشخصات الکتروشیمیایی باتری ها به

طول عمر باتری یکی از فاکتورهای اصلی محدود کننده تحقق اقتصادی خودروهای هایبرید الکتریکی است [۱]. روش های مختلفی برای کنترل شارژر به منظور افزایش طول عمر و یا کاهش زمان شارژ باتری وجود دارد. یکی از رایج ترین روش ها شارژر دو مرحله ای است. در این روش، شارژر جریان ثابت و ولتاژ ثابت با هم ترکیب می شوند. در مرحله اول باتری با جریان ثابت شارژ می شود تا جایی که ولتاژ آن به مقدار مشخصی برسد و در مرحله دوم ولتاژ ثابت به باتری اعمال می شود [۱]. معمولاً در مرحله جریان ثابت باتری تا ۷۵٪-۸۰٪ کل ظرفیت شارژ مورد نیاز، در ۲۵٪-۴۰٪ زمان شارژ، شارژ می شود و

$$\begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cs} \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)} & \frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)} & 0 \\ \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} & -\frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} & 0 \\ A(3,1) & 0 & A(3,3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cs} \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)} \\ \frac{R_e^2}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} - \frac{R_s R_t}{C_{bulk} R_e (R_e + R_s)} + \frac{R_t}{C_{surface}(R_e + R_s)} + \frac{R_e R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2} \end{bmatrix} I$$

$$A(3,1) = -\frac{R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2} + \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} - \frac{R_s^2}{C_{bulk} R_e (R_e + R_s)^2} + \frac{R_t}{C_{surface}(R_e + R_s)^2}$$

$$A(3,3) = \frac{R_s}{C_{bulk} R_e (R_e + R_s)} - \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} \quad (1)$$

در این معادلات فرض شده است که مقدار ظرفیت C_{bulk} ثابت است. اما در عمل این طور نیست. با گذشت زمان توانایی باتری برای ذخیره شارژ کاهش می‌یابد. این پدیده را با کاهش ظرفیت C_{bulk} مدل می‌کنیم. همچنین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جریان شارژ، این کاهش شدیدتر خواهد بود. برای در نظر گرفتن اثر همزمان جریان شارژ و زمان در ظرفیت خازن C_{bulk} ، آن را به صورت زیر مدل می‌کنیم:

$$C_{bulk} = k I t + C_0 \quad (2)$$

که k مقدار ثابتی است. برای به دست آوردن مقدار k از تخمین ظرفیت C_{bulk} در جریان‌های مختلف و با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته ارائه شده در مرجع [۱۱] استفاده می‌شود. جزئیات این کار در بخش ۵ آورده می‌شود. در اینجا با استفاده از نتایج به دست آمده، مقدار زیر برای k و C_0 در نظر گرفته می‌شود:

$$K = -0.02 \quad C_0 = 1000F$$

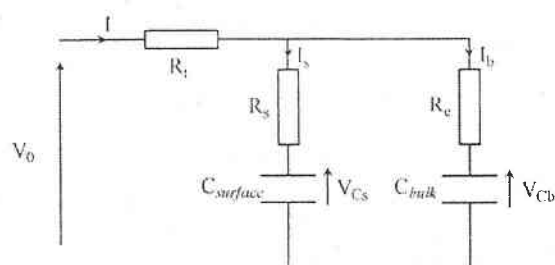
بنابراین:

دست آمده، تضمینی برای بهینه بودن راه حل وجود ندارد. در مرجع [۶] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن سیستم فازی استفاده شده است. عیب این روش این است که برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهاد شده، یک میکروکنترلر مورد نیاز است. روش شارژ چند مرحله‌ای نیز به عنوان روشی برای کاهش زمان شارژ، افزایش طول عمر و افزایش راندمان انرژی پیشنهاد شده است [۷]–[۹]، اما برای به دست آوردن جریان بهینه شارژ در هر مرحله، باید هر ترکیب ممکن از مقادیر جریان شارژ تست شود که این کار برای سازنده مقرون به صرفه نیست. در مرجع [۱۰] برای بهینه سازی جریان شارژ در هر مرحله از روش کولونی مورچه استفاده شده است.

در هیچ یک از مقالات بررسی شده از مدل باتری برای به دست آوردن جریان بهینه شارژ استفاده نشده است. در این مقاله این کار انجام شده و ظرفیت باتری (توانایی باتری برای ذخیره کردن جریان شارژ) به عنوان معیاری برای سنجش طول عمر باتری در نظر گرفته شده است. همچنین برای تست بهینه بودن جریان شارژ از فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین مقدار این کمیت استفاده می‌شود.

۲- مدل باتری

مدل‌های زیادی از باتری با درجه‌های مختلف پیچیدگی وجود دارد. برای طراحی جریان شارژ مورد نظر، به یک مدل دینامیک باتری به فرم معادلات حالت نیاز داریم. در این مقاله از مدل ارائه شده در مرجع [۱۱] استفاده می‌شود. این مدل شامل یک خازن برای نشان دادن توانایی باتری برای ذخیره شارژ (C_{bulk})، یک خازن برای مدل کردن ظرفیت سطح و اثرات پراکندگی در سلول ($C_{surface}$)، مقاومت ترمینال (R_t)، مقاومت سطح (R_s) و مقاومت انتهایی (R_e) است. (شکل ۱)



شکل ۱- مدل RC باتری

معادلات حالت باتری به صورت زیر می‌باشد: (جزئیات به دست آوردن این معادلات در مرجع [۱۱] آورده شده است)

$$C_{Capacity} = 3600 \cdot Capacity \cdot f_1(Cycle) \cdot f_2(Temp) \quad (5)$$

که در آن $Capacity$ ظرفیت نامی باتری به آمپر-ساعت و $f_1(Cycle)$ و $f_2(Temp)$ ثابت‌های وابسته به تعداد سیکل و دمای باتری هستند. با این وجود آهنگ تغییرات ظرفیت تغییری نخواهد کرد و بنابراین در صورت وارد کردن اثر دما، تنها مقدار اولیه این متغیر حالت (C_{bulk}) تغییر می‌کند.

۳- روش تندترین شیب

به دلیل غیر خطی شدن معادلات حالت، برای بهینه سازی باید از روش‌های بهینه سازی غیرخطی استفاده کنیم. یکی از این روش‌ها، روش تندترین شیب^۲ است که در اینجا شرح مختصری از آن داده می‌شود.

این روش، یک روش عددی چرخشی برای تعیین متغیر کنترلی بهینه در سیستم‌های غیرخطی است [۱۲]. در این روش از تابع همیلتونین^۳ استفاده می‌شود. به عنوان مثال اگر داشته باشیم:

$$\begin{aligned} x(t) &= a(x(t), u(t), t) \\ J &= h(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

در این صورت تابع همیلتونین عبارتست از:

$$H(x(t), u(t), p(t), t) = g(x(t), u(t), t) + p^T(t) a(x(t), u(t), t) \quad (7)$$

که در آن $p(t)$ بردار شبه حالت^۴ است و شرایط لازم برای بهینه بودن بردار کنترلی u^* عبارتند از:

$$C_{bulk} = -0.02 I t + 1000 \quad (3)$$

معادله به دست آمده برای C_{bulk} باعث می‌شود که معادلات حالت سیستم غیرخطی شوند. همچنین پارامتر C_{bulk} که قبلاً ثابت در نظر گرفته شده بود، اکنون به عنوان یکی از حالت‌ها در نظر گرفته می‌شود که مشتق آن $-0.02I$ می‌باشد. معادلات حالت جدید به صورت زیر خواهند بود:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

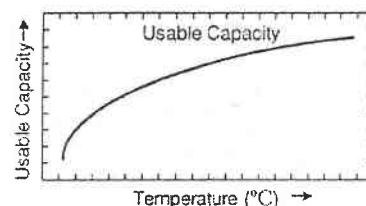
$$x = [V_{Cb}, V_{Cs}, V_o, C_{bulk}]^T$$

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} -\frac{V_{Cb}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{V_{Cs}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{IR_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ \frac{1}{C_{surface}} \left[\frac{V_{Cb}}{(R_e + R_s)} - \frac{V_{Cs}}{(R_e + R_s)} + \frac{IR_e}{(R_e + R_s)} \right] \\ V_{Cb} \cdot f_1 + V_o \cdot f_2 + I \cdot f_3 - 0.02I \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} f_1 &= -\frac{R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2} + \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} \\ &\quad - \frac{R_s^2}{C_{bulk}R_e(R_e + R_s)^2} + \frac{R_s}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} \\ f_2 &= \frac{R_s}{C_{bulk}R_e(R_e + R_s)} - \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} \\ f_3 &= \frac{R_e^2}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} - \frac{R_s R_e}{R_e C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ &\quad + \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)} + \frac{R_e R_s}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

تأثیر دما بر ظرفیت باتری

افزایش دما در باتری باعث افزایش ظرفیت قابل استفاده می‌شود [۱۳] (شکل ۲).



شکل ۲- وابستگی ظرفیت باتری به دما

این وابستگی را می‌توان به صورت رابطه زیر در مدل ظرفیت باتری وارد کرد.

^۲ - Steepest Descent
^۳ - Hamiltonian
^۴ - costate

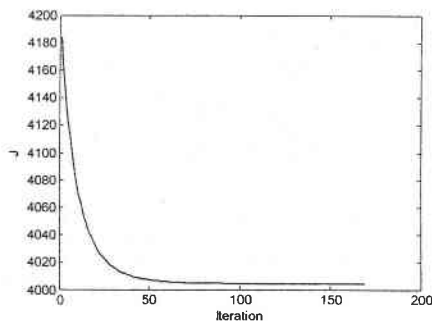
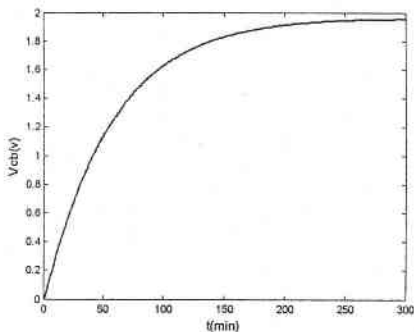
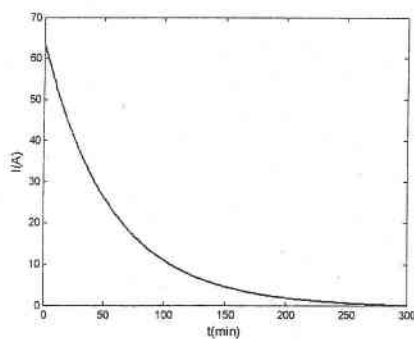
که در آن $V_{Cb_{max}}$ ولتاژ انتهایی است که باتری به آن می‌رسد و بیشترین ظرفیت باتری (در ابتدای پروسه شارژ) $C_{b,max}$ است. برای اعمال روش تندترین شیب مقادیر داده شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱

مقادیر پارامترها و ثابت‌های استفاده شده

R_e	R_s	R_t	$C_{surface}$	$V_{Cb_{max}}$	$C_{b,max}$
0.0037 5Ω	0.0037 5Ω	0.0027 45Ω	82.11 F	2V	1000

نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن مقادیر زیر برای Q_1 و Q_2 و R به صورت شکل ۳ خواهد بود.
 $Q_1=100 \quad Q_2=1 \quad R=0.1$

شکل ۳- جریان شارژ بهینه، ولتاژ خازن C_{bulk} و تابع هزینه به دست آمده

$$p(t) = -\frac{\partial H}{\partial x}(x^*(t), u^*(t), p^*(t), t)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u}(x^*(t), u^*(t), p^*(t), t) = 0 \quad (8)$$

برای حل این معادلات، ابتدا تخمینی از متغیر کنترل به عنوان مقدار اولیه $(u^0(t))$ انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از متغیر کنترل انتخاب شده و انتگرال گیری از معادلات حالت از t_0 تا t_f ، حالت سیستم به دست می‌آید. در مرحله بعد ابتدا با $x(t_f)$ به دست آمده، $p(t_f)$ را محاسبه کرده و با استفاده از آن به عنوان شرایط اولیه و نیز $x(t)$ به دست آمده، با انتگرال گیری از معادلات شبه حالت، بردار $p(t)$ و $\frac{\partial H}{\partial u}$ محاسبه می‌شوند. در صورتی که شرط زیر برقرار بود، پروسه چرخشی خاتمه می‌یابد:

$$\left\| \frac{\partial H}{\partial u} \right\| \leq \gamma \quad (9)$$

که در آن γ مقدار کوچک دلخواهی است. در غیر این صورت متغیر کنترلی جدید $u^{(i+1)}(t)$ به صورت زیر خواهد بود:

$$u^{(i+1)}(t) = u^{(i)}(t) - \tau \frac{\partial H^{(i)}}{\partial u}(t) \quad (10)$$

$u^{(i)}(t)$ را با $u^{(i+1)}(t)$ جایگزین کرده و مراحل قبل تکرار می‌شوند تا جایی که شرط (۹) برآورده شود.

با در نظر گرفتن متغیر کنترل جدید به صورت بالا تضمین می‌شود که در هر مرحله، تابع هزینه نسبت به مرحله قبل کوچکتر خواهد بود (اثبات این مطلب در مرجع [۱۲] آورده شده است) و در نهایت به کمترین مقدار خود خواهد رسید. در بخش بعد این روش به مدل باتری اعمال شده و نتایج شبیه سازی آورده می‌شود.

۴- نتایج شبیه سازی

برای بهینه سازی جریان شارژ به منظور کاهش زمان شارژ، افزایش طول عمر باتری و محدود کردن جریان، تابع هزینه زیر را در نظر می‌گیریم:

$$J = \int_0^{t_f} \left\{ (V_{Cb_{max}} - V_{Cb})^2 \cdot Q_1 + (C_{b,max} - C_{bulk})^2 \cdot Q_2 + I^2 R \right\} dt \quad (11)$$

$$f_1 = -\frac{R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2} + \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)^2}$$

$$f_2 = \frac{R_s}{C_{bulk}R_e(R_e + R_s)} - \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)}$$

$$f_3 = \frac{R_e^2}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} - \frac{R_sR_e}{R_eC_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)} + \frac{R_s}{C_{surface}(R_e + R_s)^2} \quad (12)$$

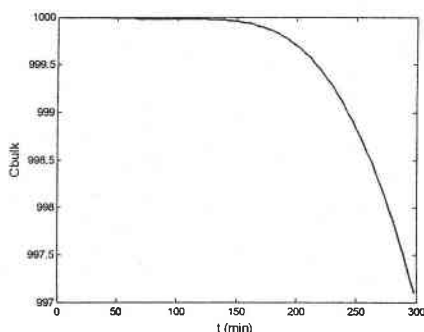
پیش‌بینی دقیق شرایط اولیه برای متغیرهای حالت تخمین زده شده مشکل است و در عمل مقدار متوسط ظرفیت اولیه خازن استفاده می‌شود. همچنین به دلیل محدود بودن اطلاعات ما درباره اغتشاش‌ها در سلول‌های مختلف باتری، تعیین ماتریس کوواریانس نویز نیز پیچیده بوده و از روی مطالعات عملی تحت فرض‌های ساده کننده و عدم وجود وابستگی بین عناصر مختلف سلول‌ها به دست می‌آید [۱۱]. ماتریس‌های کوواریانس نویز و مقادیر اولیه متغیرهای حالت به کار رفته در اینجا عبارتند از

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 0.0008 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.88 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.21 \end{bmatrix}$$

$$R=10$$

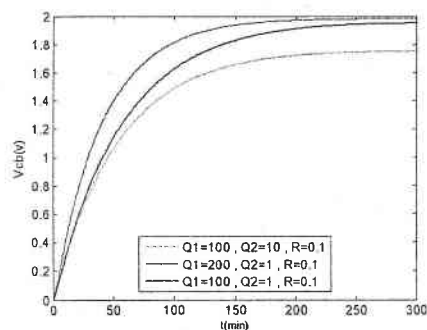
$$C_{bulk}(0) = 10^3 F$$

با استفاده از این معادلات برای جریان به دست آمده در بخش قبل، ظرفیت خازن C_{bulk} به صورت شکل ۵ تخمین زده می‌شود.



شکل ۵- ظرفیت خازن C_{bulk} برای جریان به دست آمده در بخش ۴

در صورتی که هر یک از مدت زمان شارژ و یا طول عمر باتری برای مصرف کننده دارای اهمیت بیشتری باشند، این اهمیت را می‌توان با تغییر مقدار Q_1 و Q_2 در معادلات وارد کرد. افزایش مقدار Q_1 باعث افزایش ولتاژ V_{Cb} در زمان مساوی و افزایش مقدار Q_2 باعث کاهش این ولتاژ و بهبود وضعیت سلامت باتری می‌شود. (شکل ۴)



شکل ۴- ولتاژ باتری برای مقادیر وزن‌دهی مختلف

۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای بررسی کارایی روش انجام شده و مقایسه آن با سایر روش‌ها از فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده می‌شود.

معادله در نظر گرفته شده برای C_{bulk} ، مقدار آن را در هر لحظه و برای هر جریان فقط به صورت تقریبی نشان می‌دهد و برای بررسی نتایج به دست آمده در بخش قبل مناسب نیست. به این دلیل از روش تخمین ظرفیت خازن با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته [۱۱] برای بررسی نتایج استفاده می‌کنیم. چون تغییرات مقدار C_{bulk} نسبت به سایر حالت‌های سیستم ناچیز است، مشتق آن را صفر در نظر گرفته و از مشاهده گر برای تخمین آن استفاده می‌کنیم. معادلات حالت سیستم به صورت زیر تبدیل می‌شوند.

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$x = [V_{Cb}, V_{Cs}, V_o, C_{bulk}]^T$$

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} -\frac{V_{Cb}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{V_{Cs}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{IR_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ \frac{1}{C_{surface}} \left[\frac{V_{Cb}}{(R_e + R_s)} - \frac{V_{Cs}}{(R_e + R_s)} + \frac{IR_e}{(R_e + R_s)} \right] \\ V_{Cb} \cdot f_1 + V_o \cdot f_2 + I \cdot f_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

الکتریکی باعث می‌شود که طول عمر باتری به میزان قابل توجهی بیشتر شود.

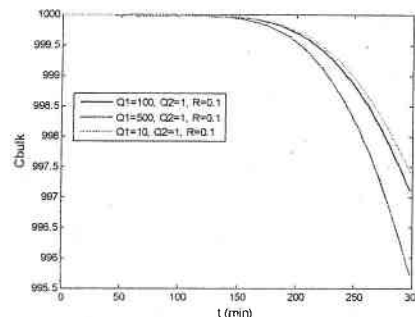
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای طراحی جریان بهینه شارژ باتری از مدل باتری استفاده شده است. این کار باعث تضمین بهینه بودن الگوریتم شارژ می‌شود. همچنین با توجه به اهمیت کاهش زمان شارژ و یا افزایش طول عمر باتری برای مصرف کننده می‌توان ماتریس‌های وزن‌دهی در تابع هزینه را به دلخواه تعیین کرد. با استفاده از این روش تنها در ۱۰۰ سیکل اولیه شارژ و دشارژ باتری، ظرفیت آن به میزان ۵٫۷٪ بهبود می‌یابد.

مراجع

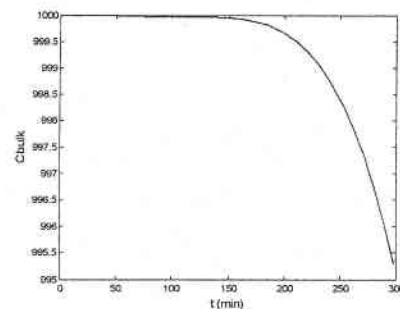
- [1] C. C. Hua, M. Y. Lin, "A Study of Charging Control of Lead-Acid Battery for Electric Vehicles", *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'2000*, Vol. 1, 2000, pp. 135-140.
- [2] G. C. Hsieh, L. R. Chen, and K. S. Huang, "Fuzzy-controlled Li-ion battery charge system with active state-of-charge controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 583-593, Jun. 2001.
- [3] R. A. Mammano, "Charging the new batteries-IC controllers track new technologies," in *Proc. Tenth Annu. Battery Conf. Applications and Advances*, 1995, pp. 171-176.
- [4] B. Tsenter and F. Schwartzmiller, "Universal charge algorithm for telecommunication batteries," in *Proc. Twelfth Annu. Battery Conf. Applications and Advances*, 1997, pp. 233-238.
- [5] S. Dilip and D. Stolzka, "Advanced algorithms and hardware for intelligent batteries," in *Proc. Tenth Annu. Battery Conf. Applications and Advances*, 1995, pp. 177-182.
- [6] H. Surmann, "Genetic optimization of a fuzzy system for charging batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 5, pp. 541-548, Oct. 1996.
- [7] T. Ikeya, N. Sawada, S. Takagi, J. Murakami, and K. Kobayashi et al., "Multi-step constant-current charging method for electric vehicle, valve-regulated, lead/acid batteries during night time for load-leveling," *J. Power Sources*, vol. 75, no. 1, pp. 101-107, Sep. 1998.
- [8] T. Ikeya, N. Sawada, J. Murakami, and K. Kobayashi et al., "Multi-step constant-current charging method for an electric vehicle nickel/metal hydride battery with high-energy efficiency and long cycle life," *J. Power Sources*, vol. 105, no. 1, pp. 6-12, Mar. 2002.
- [9] R. F. Nelson, E. D. Sexton, J. B. Olson, M. Keyser, and A. Pesaran, "Search for an optimized cyclic charging algorithm for valve-regulated lead-acid batteries," *J. Power Sources*, vol. 88, no. 1, pp. 44-52, May 2000.
- [10] Y. H. Lio, J. H. Teng, Y. C. Lin, "Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using ant colony system algorithm" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, pp. 1328-1336, Oct 2005.
- [11] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, C. M. Bingham, "Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead acid batteries for hybrid-electric vehicles" *IEEE Trans. Vehicular technology*, vol. 54, pp. 783-794, May 2005.
- [12] D. E. Kirk, "Optimal control theory" Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 329-343, 1970
- [13] Min Chen, Gabriel A. Rincón-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance", *IEEE Trans. on energy and conversion*, vol. 21, no. 2, June 2006

شکل ۶ ظرفیت تخمین زده شده را برای Q_1 و Q_2 افزایش یافته نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش Q_2 باعث بهبود وضعیت C_{bulk} می‌شود.

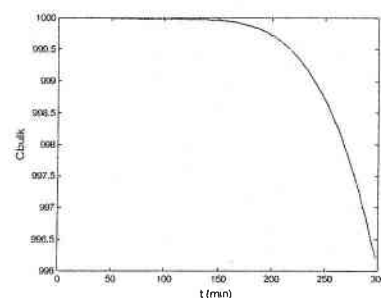


شکل ۶ - ظرفیت خازن C_{bulk} برای مقادیر وزن‌دهی مختلف

برای مقایسه روش ارائه شده با سایر روش‌های شارژ، باتری را با جریان ثابت و جریان چند مرحله‌ای تا جایی که ولتاژ V_{Cb} به ۲ ولت برسد، شارژ کرده و ظرفیت C_{bulk} را دوباره تخمین می‌زنیم. شکل‌های ۷ و ۸ نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- ظرفیت خازن C_{bulk} برای جریان شارژ ثابت



شکل ۸- ظرفیت خازن C_{bulk} برای جریان شارژ چند مرحله‌ای

همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از الگوریتم شارژ به دست آمده در این مقاله کاهش ظرفیت باتری نسبت به روش‌های دیگر کمتر خواهد بود. این مسئله در شارژ و دشارژهای متعدد باتری در کاربردهای خودروهای هیبرید