

تخمین وضعیت شارژ باتری با استفاده از فیلتر کالمن

سید علی سیدی سعادت، ابوالفضل حلوی نیاسر

دانشگاه کاشان، e_ali_seyedi@yahoo.com

دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی - گروه برق، halvaei@kashanu.ac.ir

چکیده - در وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی، منبع انرژی برای حرکت آن، همان باتری بوده و وضعیت شارژ (SOC) آن، یک پارامتر ضروری در وسیله نقلیه می باشد، چرا که مقیاسی برای مقدار انرژی باقیمانده در آن است. تخمین وضعیت شارژ کار ساده ای نیست چرا که تحت تاثیر عواملی مانند: دما، ظرفیت باتری و مقاومت داخلی آن می باشد. وضعیت شارژ مناسب، در محدوده $20\% \leq SOC \leq 90\%$ بوده و باید قادر به تخمین آن باشیم تا وضعیت شارژ در محدوده امنی قرار گیرد. از جمله روشهای تخمین وضعیت شارژ باتری: استفاده از جریان شارژ، تخمین ولتاژ مدار باز و تخمین حالت با استفاده از فیلترها است که خود شامل فیلتر کالمن، فیلتر کالمن تعمیم یافته و فیلتر کالمن تعمیم یافته کاهش مرتبه می باشد. در این مقاله روشهای نامبرده بررسی و روش فیلتر کالمن شبیه سازی و نتایج با مقدار واقعی مقایسه گردیده است. کلید واژه- وضعیت تخمین شارژ (SOC)، ولتاژ مدار باز (OCV)، فیلتر کالمن (KF)، فیلتر کالمن تعمیم یافته (EKF)

۱ - مقدمه

$I_b(t)$: جریان شارژ باتری

$Q_0 = \int_{t_0}^{\infty} I_b(\tau) d\tau$: شارژ کلی تحویل شده به باتری

$SOC = \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100$ (۱): وضعیت شارژ به درصد

از آنجا که این روش یک تابع یکطرفه می باشد، مناسب نیست.

۳ - روش تخمین ولتاژ مدار باز

روش دیگر، استفاده از ولتاژ مدار باز V_{oc} (ولتاژ در زمانی که جریان صفر است) می باشد:

$S(t)$: وضعیت شارژ به درصد

a_0 : ولتاژ ترمینال با فرض تخلیه کامل

V_{oc} : ولتاژ ترمینال در شارژ کامل

$$V_{oc}(t) = a_1 S(t) + a_0 \rightarrow S(t) = \frac{V_{oc}(t) - a_0}{a_1} \quad (2)$$

لذا با تخمین V_{oc} می توان با یک رابطه خطی و ساده (۲) به

رشد سریع کاربرد وسایل و تجهیزات الکتریکی، باعث افزایش تقاضای بسیار زیاد انواع باتریها و توسعه روزافزون تکنولوژی مرتبط با آنها همچون کنترل شارژ، نمایش ظرفیت باتری و اطلاعات زمان کارکرد باقیمانده و ... شده است. در این مقاله راههای تخمین وضعیت شارژ باتری که از مهمترین پارامترهای مورد استفاده در وسایل الکتریکی به خصوص وسایل نقلیه می باشد، بررسی گردیده است. با توجه به محدودیتهای موجود برای اندازه گیری مستقیم میزان شارژ، معمولا از تخمینگرها که دارای ورودیهای قابل دسترس نظیر ولتاژ دو سر باتری می باشند، استفاده می شود. در بین تخمینگرها، فیلتر کالمن به دلیل نتایج تخمینی مناسب و دقیق از اهمیت زیادی برخوردار است، لذا در این مقاله پس از ارائه و توضیح روشهای مختلف تخمین شارژ با استفاده از یک فیلتر کالمن، نتایج، شبیه سازی و معتبر می گردد.

۲ - استفاده از جریان شارژ

یکی از راههای تعیین وضعیت شارژ استفاده از جریان شارژ است:

۳ ۴ مدل ریاضی :

در این بخش با استفاده از معادلات (۳)، (۴) و در حالت دشارژ معادلات بسط داده شده و محاسبات برای تعیین پارامترهای نامعلوم انجام می شود :

$$V_p = \frac{1}{C} \left(\frac{V_{oc} - V_p}{R_d} - I_b \right) \quad (5)$$

معادله ۳ →

$$V_b = V_p - I_b \cdot R_b$$

برای ایجاد معادلات فضای حالت، متغیرهای زیر را تعریف می کنیم:

$$x_1 = V_p, \quad x_2 = \frac{1}{C \cdot R_d}, \quad x_3 = \frac{V_{oc}}{C \cdot R_d}, \quad x_4 = \frac{1}{C}, \quad x_5 = R_b \quad (6)$$

در نتیجه معادلات فضای حالت غیر خطی متغیر با زمان به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{x}_1 = -x_1 x_2 + x_3 - I_b x_4, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x}_4 = \dot{x}_5 = 0$$

$$V_b = x_1 - I_b x_5 \quad (7)$$

در این مدل $x(0) = (x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_{50})^T$ نامعلوم است. با توجه به روابط داریم: $V_{oc} = \frac{x_{30}}{x_{20}}$ ، لذا برای تعیین ولتاژ مدار باز باید تخمینی از مقادیر اولیه x_{20} و x_{30} بدست آوریم. در مقالات مختلف روشهای گوناگونی، از جمله فیلتر کالمن تعمیم یافته استفاده شده ولی ما در اینجا از روش تبدیل معادلات به صورت خطی متغیر با زمان استفاده می کنیم که در این مدل پارامتر نامعلوم خواهد بود، لذا داریم:

$$Z_2 = x_3, \quad Z_3 = x_4, \quad Z_4 = x_5, \quad Z_1 = x_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{20} & 1 & -I_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix}, \quad z(0) = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \\ x_{50} \end{bmatrix}$$

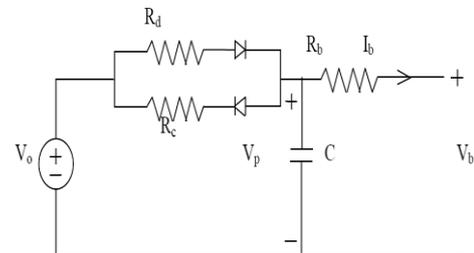
$$y(t) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad -I_b] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

نکته مهم در بررسی مدل سیستم (۸) آنست که اگر جریان $I_b(t)$

وضعیت شارژ دست یافت. البته این روش به علت پسماند ولتاژ در طول شارژ و دشارژ بسیار سخت است. با توجه به اینکه برای اندازه گیری V_{oc} باید باتری از بار جدا شود و این کار در طول کارکرد ماشین امکان پذیر نیست، لذا باید تخمین زده شود. در اینجا سعی شده تا با اندازه گیری ولتاژ و جریان ترمینال باتری، ولتاژ مدار باز و در نتیجه وضعیت شارژ آن تخمین زده شود.

۳ ۴ مدل باتری :

مدل عمومی باتری به صورت یک مقاومت داخلی ثابت و یک باتری ایده آل می باشد. مقاومت داخلی در شرایط شارژ و دشارژ، مقادیر مختلفی دارد. R_c مقاومت حالت شارژ و R_d مقاومت حالت دشارژ است. این دو مقاومت کلیه تلفات انرژی داخل باتری اعم از الکتریکی و غیر الکتریکی را مدل می کند. شکل ۱ مدل کامل باتری را نشان می دهد. با حضور دیودها در هر یک از مراحل شارژ یا دشارژ، فقط یکی از مقاومتها در مدار است، البته دیودها از لحاظ فیزیکی موجود نیستند. برای مدل کردن حالت دینامیکی داخلی باتری به خصوص اثر انتشار الکترولیتی و جریان گذرا در باتری، یک خازن با ظرفیت C به مدار اضافه و مدل کامل بدست می آید :



شکل ۱ - مدل کامل باتری

لازم به توضیح است که جهت مثبت I_b برای حالت دشارژ است، همچنین هیچ یک از پارامترهای C, R_d, R_c از قبل مشخص نبوده و V_p قابل اندازه گیری نمی باشد. معادلات دینامیکی برای مدار شارژ و دشارژ به صورت زیر است :

$$\dot{V}_p = -V_p \frac{1}{C \cdot R_d} + V_{oc} \frac{1}{C \cdot R_d} - \frac{1}{C} I_b, \quad V_p \leq V \quad (9)$$

$$\dot{V}_p = -V_p \frac{1}{C \cdot R_c} + V_{oc} \frac{1}{C \cdot R_c} - \frac{1}{C} I_b, \quad V_p \geq V_{oc} \quad (10)$$

$$I_b = \frac{V_p - V_{oc}}{R_b}$$

تصحیح. مدل پروسه برای پیش بینی (تخمین) حالت به صورت حدسی و مدل اندازه گیری برای تصحیح آن بکار می رود. در معادلات بعدی \hat{x} به عنوان تخمین حالت شناخته می شود و قبل از تصحیح، تخمین حالت با \hat{x}^- و پس از تصحیح، با \hat{x}^+ نشان داده می شود.

مرحله تخمین:

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1} \quad (11)$$

$$\Sigma \hat{x}_k^- = A_{k-1} \Sigma \hat{x}_{k-1}^+ A_{k-1}^T + \Sigma w \quad (12)$$

مرحله تصحیح:

$$L_k = \Sigma \hat{x}_k^- C_k^T [C_k \Sigma \hat{x}_k^- C_k^T + \Sigma v]^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - C_k \hat{x}_k^- - D_k u_k] \quad (14)$$

$$\Sigma \hat{x}_k^+ = (I - L_k C_k) \Sigma \hat{x}_k^- \quad (15)$$

۵- روش استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته

فیلتر کالمن راه حل بهینه برای سیستمهای خطی را بیان می کند، ولی در حقیقت باتری یک سیستم غیر خطی است، لذا فیلتر کالمن تعمیم یافته EKF باید استفاده گردد که از اکثر قوانین فیلتر کالمن پیروی می کند و بهرحال سیستم را در هر مرحله زمانی خطی سازی کرده و سیستم غیر خطی را به عنوان یک سیستم متغیر با زمان خطی LTV حل می کند.

۵-۴ مدل سیستم غیر خطی:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (16)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (17)$$

در هر بازه زمانی توابع $f(x_k, u_k)$ & $g(x_k, u_k)$ با استفاده از بسط مرتبه اول تیلور حول نقطه $x_k = \hat{x}_{k-1}^+$ برای مدل پروسه و $x_k = \hat{x}_k^-$ برای مدل اندازه گیری، خطی می شود.

$$f(x_k, u_k) \approx f(\hat{x}_{k-1}^+, u_k) + \partial f(x_k, u_k) / \partial x_k |_{x_k = \hat{x}_{k-1}^+} (x_k - \hat{x}_{k-1}^+)$$

(18)

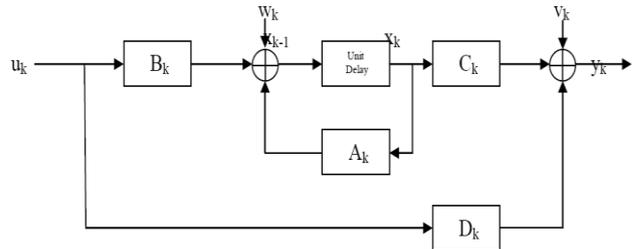
ثابت باشد، نتایج سیستم خطی متغیر با زمان رویت پذیر نیست. اگر جریان را به صورت $I_b(t) = a + b(t-t_0) + c(t-t_0)^2$ فرض کنیم، این سیستم تنها در صورتی رویت پذیر است که $c \neq 0$ باشد.

۴- روش استفاده از فیلتر (کالمن)

فیلتر کالمن یک نمونه از تخمین حالت بهینه است. وضعیت سیستم به عنوان متغیرهایی که مستقیماً قابل اندازه گیری نیستند و نمی توانند یک گزارش کامل از شرایط داخلی سیستم ارائه کنند، تعریف می شود. فیلتر کالمن برای تخمین وضعیت سیستمی که با یک مدل پروسه و یک مدل اندازه گیری داده شده، بکار می رود و بر اساس فرضیه مارکوف که حالت سیستم کاملاً بوسیله حدس قبلی آن و ورودیهای کنترل جریان و خروجیهای اندازه گیری می باشد، استوار است.

۴-۴ مدل سیستم خطی متغیر با زمان (LTV):

این مدل مطابق است با شکل ۲ که به صورت زیر است:



شکل ۲- مدل سیستم LTV

در این سیستم معادلات حالت به صورت زیر است:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (9)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (10)$$

که x_k همان بردار حالت و u_k بردار ورودی کنترلی و y_k بردار خروجی اندازه گیری می باشد. معادله ۹ معادله مدل پروسه و معادله ۱۰ معادله مدل اندازه گیری است. در مدل پروسه w_k نویز سفید پروسه مفروض با میانگین صفر و گوسی با کواریانس Q_k و در مدل اندازه گیری v_k نویز سفید اندازه گیری مفروض با میانگین صفر و گوسی با کواریانس R_k است:

$$w_k \sim (0, Q_k) \quad \& \quad v_k \sim (0, R_k)$$

فیلتر کالمن دو مرحله دارد: مرحله پیش بینی (تخمین) و مرحله

فلسفه و تئوری باید قابل فهم باشد، و الگوریتم باید به اندازه کافی برای سرعت پروسه و سهولت کاربرد، ساده باشد.

مدل EKF باتری :

مدل پروسه باتری باید یک تابع از ورودی کنترلی باشد که در اینجا همان جریان باتری است. یادآوری می شود که حالتی که باید تخمین زده شود، «وضعیت شارژ» (SOC) است، لذا داریم:

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_n} \int I_b - I_{loss} dt \quad (27)$$

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \frac{\eta i_k \Delta t}{C_n} + w_k \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، C_n ظرفیت نامی باتری بر حسب آمپر-ثانیه و η بازده کولمبیک باتری برای شارژ و دشارژ می باشد، (نرخ تعداد الکترون شارژ شده که در طول شارژ در مقایسه با تعدادی که می تواند به طور موثر در طول دشارژ است فاده شود) و مقدار آن برای شارژ ۱ و برای دشارژ ۰.۹۹۲ فرض می شود. اساس مدل اندازه گیری، مدل ساده (OCV) (open circuit voltage) است :

$$y_k = OCV(SOC_k) - R_i i_k \quad (29)$$

با فرض اینکه مقاومت شارژ و دشارژ مقدار ثابتی باشد، حلقه هیستریز می تواند به رابطه فوق اضافه گر دد که مدل «حالت صفر» حاصل میشود:

$$y_k = OCV(SOC_k) - R_i i_k + s_k M(SOC_k) \quad (30)$$

۶- روش فیلتر کالمن تعمیم یافته کاهش مرتبه :

روش فیلتر کالمن تعمیم یافته (EKF) برای تخمین SOC دارای مشکلاتی نظیر زمان محاسبه طولانی و حساسیت زیاد به خطا و اغتشاش پارامترهاست. لذا یک مدل EKF کاهش مرتبه شامل مدل مشاهده نویز و عدم پذیرش داده (Data rejection) پیشنهاد میشود. برای کاهش زمان محاسبه، مدل باتری ساده سازی شده و برای حل مشکل حساسیت پارامتر ن اشی از ساده سازی و بالا بردن دقت مدل، نویز رویت به صورت مجزا در نواحی که مدل به صورت مقایسه ای درست یا نادرست است، اندازه گیری می شود و مشکل حساسیت ناشی از اغتشاش توسط عدم پذیرش داده، کاهش می یابد.

$$g(x_k, u_k) \approx g(\hat{x}_k^-, u_k) + \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k^-} (x_k - \hat{x}_k^-) \quad (19)$$

با تعریف A_k , C_k به صورت زیر و ترکیب روابط بالا، مدل‌های خطی اندازه گیری و پروسه را خواهیم داشت :

$$\hat{A}_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_{k-1}^-}$$

$$\hat{C}_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k^-}$$

$$x_{k+1} \approx \hat{A}_k x_k + f(\hat{x}_k^-, u_k) - \hat{A}_k \hat{x}_k^- + w_k \quad (20)$$

$$y_k = \hat{C}_k x_k + g(\hat{x}_k^-, u_k) - \hat{C}_k \hat{x}_k^- + v_k \quad (21)$$

برای تعریف پروسه تکرار EKF، باید B_k فیلتر کالمن با دو عبارت میانی مدل پروسه و D_k با دو عبارت میانی مدل اندازه گیری جایگزین شود. پروسه نهایی بسیار شبیه فیلتر کالمن استاندارد خواهد بود:

مرحله تخمین :

$$\hat{x}_k^+ = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}) \quad (22)$$

$$\Sigma \hat{x}_k^- = \hat{A}_{k-1} \Sigma \hat{x}_{k-1}^+ \hat{A}_{k-1}^T + \Sigma w \quad (23)$$

مرحله تصحیح :

$$L_k = \Sigma \hat{x}_k^- \hat{C}_k^T [C_k \Sigma \hat{x}_k^- \hat{C}_k^T + \Sigma v]^{-1} \quad (24)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k)] \quad (25)$$

$$\Sigma \hat{x}_k^+ = (I - L_k C_k) \Sigma \hat{x}_k^- \quad (26)$$

۵ ۴ توسعه مدل: طراحی فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین شارژ باتری (SOC) :

جهت طراحی SOC-EKF الگوریتم زیر مورد استفاده خواهد بود:

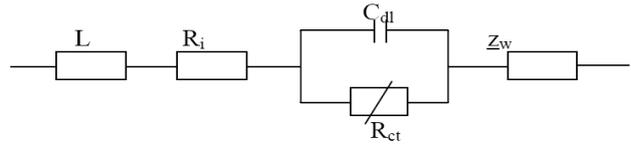
تهیه یک تخمین دقیق از SOC با تفکیک سیکلهای تست تهیه حدود خطای قابل توجه از تخمین SOC

شکل ۵ - مدل ساده شده

۶-۱ مدل باتری Li-Ion :

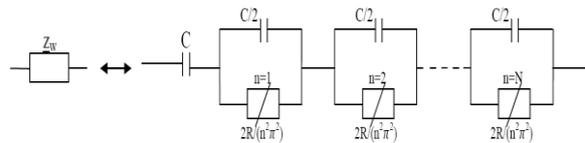
مدل مدار پایه - امیدانس :

مشخصات الکترو شیمیایی باتری به صورت زیر دسته بندی میشود : مقاومت داخلی R_i - انتقال شارژ R_{ct} - نفوذ (انتشار) Z_w - لایه دوتایی (دوبل) C_{dl} - امیدانس مزاحم L



شکل ۳ - مدل باتری Li-ion

معمولاً پدیده انتشار و لایه دوتایی در باتری با CEP نشان داده می شود، که این مدل شامل تعداد نامحدودی نردبان RC است، که باید در راستای کاهش متغیرها و زمان محاسبات، ساده شود :



شکل ۴ - مدل پدیده انتشار

برای ساده سازی مدار بالا، یک فرضیه را در نظر می گیریم و آنست که، مدار به سه قسمت تقسیم میشود : قسمت اول دارای ثابت زمانی بسیار کوچک (سریع)، قسمت دوم ثابت زمانی بیشتر ولی باز هم ناچیز و قسمت سوم دارای ثابت زمانی قابل توجه است. لذا در قسمت اول، مدار نردبان RC با یک مقاومت، مدار قسمت دوم با یک مقاومت و برای جبران خطای آن، از یک مدل نویز مشاهده استفاده شده و مدار قسمت سوم بدون تغییر مدل میشود. برای ساده سازی پارامترهای غیر خطی، باید پارامترها در ناحیه میانی SOC که کاملاً خطی است، بدست آورد که باعث میشود تا خطای مدل در ناحیه آخر SOC (که غیر خطی است)، در نویز مشاهده در نظر گرفته شود . مدل ساده شده در شکل ۵ نشان داده شده است:

۶-۲ مدل فیلتر کالمن تعمیم یافته کاهش مرتبه :

مدل دینامیکی EKF به صورت زیر است:

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{i}{C_n} \dots \dots \dots SOC_k = SOC_{k-1} + \frac{\Delta t}{C_n} i_{k-1} \quad (31)$$

$$\frac{dv_{Diff}}{dt} = \frac{i}{C_{Diff}} - \frac{v_{Diff}}{C_{Diff}R_{Diff}} \dots \dots$$

$$V_{Diff_k} = \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{Diff}R_{Diff}}\right) \cdot V_{Diff_k-1} + \frac{\Delta t}{C_{Diff}} i_{k-1} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{Diff_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{Diff}R_{Diff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ V_{Diff_k-1} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_{Diff}} \end{bmatrix} i_{k-1} \quad (33)$$

مدل اندازه گیری به صورت یک تابع غیرخطی به صورت زیر بیان میشود:

$$V_T = h_k(OCV, V_{Diff}) - V_S = OCV - V_{Diff} - V_S \quad (34)$$

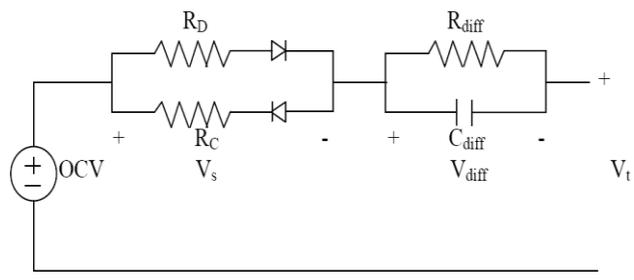
$$\frac{\partial h_k}{\partial x_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{soc}(SOC)}{\partial SOC} & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad OCV = h_{soc}(SOC), \quad h_{soc} = f_{ocv}^{-1} \quad (35)$$

در معادلات فوق، نمودار OCV-SOC می تواند تابع OCV را مشخص کند.

۷ - شبیه سازی:

در این بخش با استفاده از یک مدل نمونه باتری و یک فیلتر کالمن در محیط Simulink نرم افزار Matlab به اندازه گیری SOC واقعی و تخمینی می پردازیم، و خطای تخمین نیز محاسبه و نمایش داده میشود.

در مدل نمونه بکار رفته، باتری با یک مدار درجه دوم مدل شده و در دو مرحله شارژ و دشارژ شبیه سازی میشود . مدار الکتریکی





$$C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

ماتریس اندازه گیری

$$Z = [V_{Cs} \quad V_o \quad V_{Cb}]^T$$

ماتریس حالت

$$Z_0 = [0 \quad 0 \quad 16.633]$$

ماتریس حالت اولیه

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ماتریس اولیه کوواریانس خطای تخمین

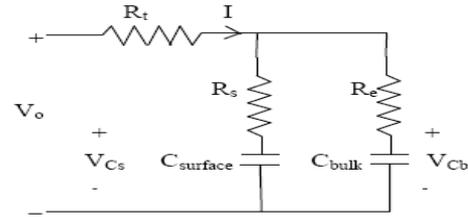
$$Q = \begin{bmatrix} 0.00015 & 0 & 0 \\ 0 & 0.419 & 0 \\ 0 & 0 & 0.81 \end{bmatrix}$$

کوواریانس نویز پروسه

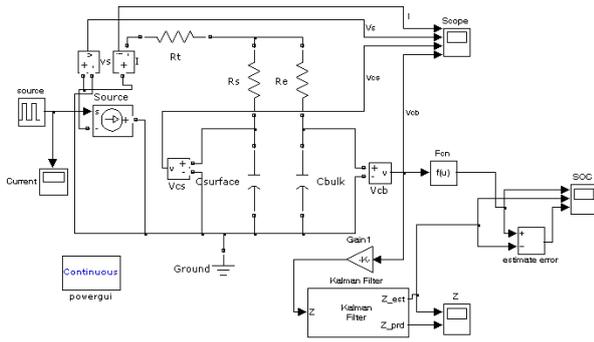
$$R = 10$$

کوواریانس نویز اندازه گیری

مربوطه در ذیل مشخص شده است :



شکل ۶ - مدار معادل شبیه سازی



شکل ۷ - مدار شبیه سازی

در این مدار پارامترها به شرح ذیلند :

C_{bulk} : توانایی باتری در ذخیره شارژ
 $C_{surface}$: ظرفیت سطح و اثرات پراکندگی
 R_s : مقاومت سطح
 R_e : مقاومت انتهایی
 R_t : مقاومت ترمینال
از آنجا که C_{bulk} معرف توانایی شارژ باتریست، لذا ولتاژ آن V_{Cb} معرف میزان شارژ یا همان SOC خواهد بود.

۷ ۴ وضعیت شارژ :

در این حالت، باتری با یک منبع جریان ثابت ۵ آمپر و به مدت یک ساعت شارژ شده که در این حالت ولتاژ خازن C_{bulk} به مقدار ۱۶.۶۳۳ ولت میرسد، که این مقدار به عنوان $SOC_{100\%}$ و حداقل ولتاژ (صفر ولت) به عنوان $SOC_{0\%}$ منظور میشود.

۷ ۴ وضعیت دشارژ :

در این حالت، بار را با یک منبع جریان ۱ آمپری مدل کرده و زمان آنرا میتوان به دلخواه تعیین کرد که در اینجا ما آنرا ۱ و ۲ و ۳ ساعت منظور کرده و نتایج را ثبت می کنیم . نتایج شامل SOC_{Actual} ، $SOC_{Estimate}$ و $Estimation\ error$ خواهد بود. برای تخمین SOC از یک فیلتر کالمن استفاده شده است که پارامترهای آن با توجه به مقدار پارامترهای مدار تعیین میشود. مقادیر نوعی به قرار ذیل میباشد :

Circuit Parametere :

$$C_{bulk} = 1000 \text{ F} \quad , \quad C_{surface} = 82.11 \text{ F} \quad ,$$

$$R_s = R_e = 0.00375 \Omega \quad , \quad R_t = 0.002745 \Omega$$

$$V_{Cb} = 16.633 \text{ v} \quad , \quad V_{Cs} = 0$$

Kalman Filter Parametere :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 \\ -0.0001 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

ماتریس انتقال حالت

مراجع

- [1] John Chiasson, Baskar Vairamohan, "Estimating the State of a Battery".
- [2] Michael Wahlstrom, "Design of a Battery State Estimator Using a Dual Extended Kalman Filter".
- [3] A thesis presented to the University of Waterloo.
- [4] Oanyong Nam, Jaemoon Lee, Jaeho Lee, Jonghun Kim And B.H. Cho, "Li-Ion Battery SOC Estimation Method based on the Reduced Order Extended Kalman Filtering", Power Electronics System Laboratory, Seoul National University, Seoul, Korea.
- [5] Wang yan, Yin Tian-ming & Liu Bao-jie, "Lead-acid Power Battery Management System Basing on Kalman Filtering", School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing.

[۶] "بهینه سازی جریان شارژ باتریهای سربی- اسیدی برای کاربرد در خودروهای هیبرید الکتریکی با استفاده از روش تندترین شیب" هدا صابری و فرزاد رجایی ، دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران