

مدل سازی امپدانس داخلی باتری سرب اسید با در نظر گرفتن اثر سطح شارژ

عباس شولائی

shoulaei@iust.ac.ir

مهدی صدی

msadri@ee.iust.ac.ir

دانشکده مهندسی برق، آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - یکی از مهمترین مشکلات استفاده از باتری ها در مدارهای الکتریکی، عدم شناخت صحیح و مناسب از ساختمان و عملکرد آنها در فرآیند شارژ و دشارژ می باشد. در این مقاله با هدف شناخت عمیق تر باتری ها به بررسی رفتار الکتریکی و مدل سازی آنها پرداخته شده است. از آنجا که یک مدل کاربردی نیازمند پارامترهای قابل اندازه گیری و همچنین روش اندازه گیری ساده و مناسب می باشد، در این مقاله به معرفی یک روش ساده اندازه گیری امپدانس باتری پرداخته شده است. با بررسی نتایج عملی حاصل از روش معرفی شده و شبیه سازی مدل بدست آمده، روش ارائه شده اعتبارسنجی شده است.

کلید واژه- باتری، مدل سازی، امپدانس، شبیه سازی.

و سطح شارژ باتری پرداخته است. تعیین سطح شارژ که از مهمترین مسائل مطرح در استفاده از باتری ها است در حال حاضر غالباً با استفاده از اندازه گیری مقدار ولتاژ انجام می گیرد. این روش که به تنهایی قادر به تخمین دقیق سطح شارژ در شرایط بارگیری نیست نیازمند الگوریتم های جانبی دیگری می باشد که ساده ترین آنها با در نظر گرفتن جریان و امپدانس باتری مقدار ولتاژ داخلی باتری را به عنوان شاخص، مورد نظر قرار می دهند [۳].

به این ترتیب به منظور استفاده کارآمد از باتری ها نیاز به اندازه گیری امپدانس داخلی آنها وجود دارد. روشی که برای اندازه گیری در این مراجع استفاده شده است، بر اساس روش اندازه گیری طیف امپدانس الکتروشیمیایی است که تحت عنوان EIS^۱ شناخته می شود و کاربردهای مهمی در صنعت الکتروشمی دارد.

در این مقاله با در نظر گرفتن مفهوم EIS، یک روش ساده برای اندازه گیری مقدار امپدانس باتری با دقت مناسب معرفی و سپس صحت روش معرفی شده در یک آزمایش عملی بررسی شده است.

در ادامه ابتدا با معرفی ماهیت رفتار امپدانس باتری، مفهوم وابستگی آن به فرکانس نشان داده شده و سپس با توجه به نوع تغییرات امپدانس با فرکانس، ساختار مدل الکتریکی مناسب

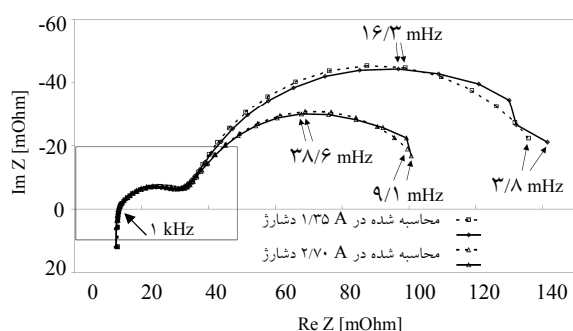
۱- مقدمه

باتری به عنوان ساده ترین وسیله ذخیره سازی انرژی الکتریکی کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف پیدا کرده است و نیاز روز افزون نسبت به آن باعث شده است تا تلاش به منظور بهبود کیفیت و افزایش بهره وری از آن ادامه داشته باشد. پس از مسائل مطرح در زمینه تکنولوژی ساخت باتری، آنچه بیش از همه حائز اهمیت است، چگونگی نگهداری و مدیریت استفاده از آن می باشد. اطلاعات ارائه شده توسط سازندگان باتری تنها شامل حدود ولتاژ و جریان مجاز در حالت شارژ و دشارژ می باشد و این پاسخگوی نیاز کاربردهای خاص نظیر کاربردهای پالسی نمی باشد. به منظور بررسی عملکرد باتری ها در چنین کاربردهایی نیاز به یک مدار معادل الکتریکی است تا بتوان با توجه به مدار معادل و اطلاعات شرکت سازنده، به طراحی مدار کاربردی مورد نظر پرداخت.

به عنوان نمونه در [۱] با در نظر گرفتن امپدانس باتری ها به مدل سازی آنها به منظور استفاده در کاربردهای الکترونیک قدرت پرداخته شده است. با مطالعه امپدانس باتری نشان داده شده است که پارامترهای امپدانس وابسته به سطح شارژ باتری نیز می باشد و همین مسئله باعث شده است تا از آن به عنوان معیاری در تعیین سطح شارژ باتری ها استفاده گردد. در [۲] با مرور روش ها اندازه گیری امپدانس به ارتباط آن با تعیین سلامت

1- Electrochemical Impedance Spectroscopy

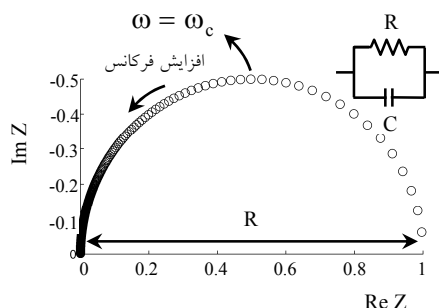
ظاهر می‌شود، با کاهش فرکانس تغییرات و به عبارت دیگر با نزدیک شدن به حالت جریان ثابت، امپدانس داخلی تنها به صورت مقاومتی عمل خواهد کرد. از طرف دیگر با افزایش فرکانس، تأخیر در تغییرات ولتاژ نسبت به جریان ناچیز شده و رفتار مقاومتی غالب خواهد بود. این مسئله در شکل ۲ که از اندازه‌گیری بدست آمده، دیده می‌شود. در این شکل نمودار نایکوئیست تغییرات امپدانس باتری در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است [۴]. به این ترتیب، رفتار خازنی در یک محدوده فرکانسی مشخص قابل توجه می‌شود و در دو انتهای منحنی که متناظر با فرکانس‌های پایین و بالا هستند امپدانس موهومی مقدار کوچکی دارد.



شکل ۲: نمودار نایکوئیست امپدانس باتری VRLA، ۱۲V، ۲۷/۵Ah [۴]

۳- ساختار مدل امپدانس

استفاده از نمودار نایکوئیست اندازه‌گیری شده مانند شکل ۲ نیازمند یک مدل پایه می‌باشد که بتواند در فرکانس‌های مختلف رفتاری مشابه شکل مذکور داشته باشد. با مشخص شدن ساختار و نوع المان‌های این مدل پایه می‌توان از نمودار اندازه‌گیری شده به منظور استخراج پارامترهای مدل استفاده نمود.



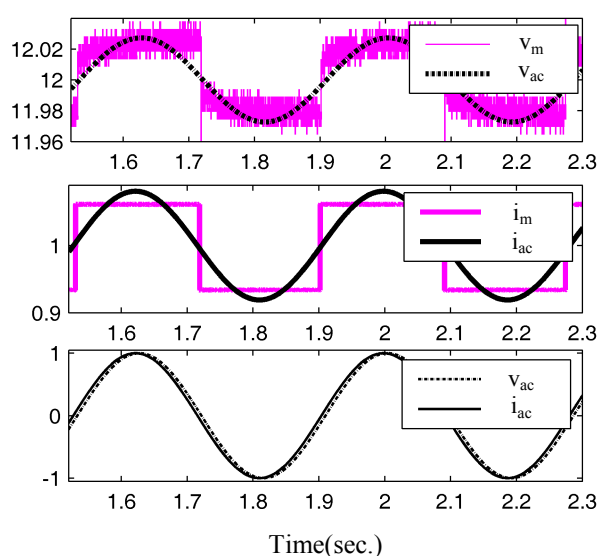
شکل ۳: نمودار نایکوئیست امپدانس یک مدار RC موازی.

با دقت در نمودار نایکوئیست امپدانس باتری و مقایسه با نمودار نایکوئیست امپدانس یک مدار RC موازی که در شکل ۳ آمده است، تشابه قابل ملاحظه‌ای نتیجه می‌شود. با توجه به اینکه در نمودار بدست آمده برای باتری دو کمان مجزا قابل

جهت مدل‌سازی امپدانس باتری معرفی و چگونگی انتخاب مقادیر پارامترهای آن معرفی می‌شود. در نهایت امپدانس یک باتری سرب اسید VRLA^۱ اندازه‌گیری شده و صحت مدل امپدانی بدست آمده با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- رفتار امپدانی یک باتری

رفتار امپدانی باتری زمانی ظاهر می‌شود که بارگیری از آن دچار نوسان گردد. در شکل ۱ نمونه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده یک باتری ۱۲ ولت، ۷ آمپر ساعت از نوع VRLA نشان داده شده است.



شکل ۱: تغییرات ولتاژ و جریان باتری مورد آزمایش.

در شکل ۱ تغییرات ولتاژ و جریان شارژ باتری نشان داده شده است. در این شکل ولتاژ اندازه‌گیری شده و V_{ac} مولفه اول تغییرات ولتاژ است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود تغییرات ولتاژ باتری نسبت به تغییرات جریان دارای تأخیر است به این صورت که با افزایش جریان، مقدار ولتاژ با یک ثابت زمانی مشخص افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش جریان، بازایی ولتاژ با تأخیر انجام می‌گیرد. با در نظر گرفتن مولفه اول تغییرات ولتاژ و جریان، که در شکل با V_{ac} و i_{ac} نشان داده شده، با توجه به تأخیر ولتاژ نسبت به جریان، یک رفتار خازنی قابل مشاهده است و نتیجه می‌شود امپدانس داخلی باتری مقاومتی خالص نمی‌باشد.

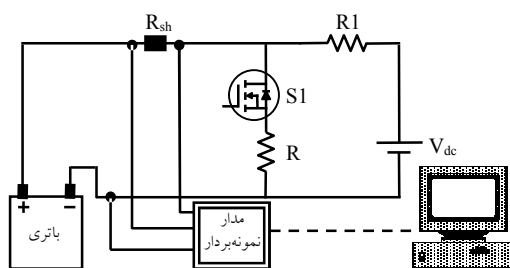
از آنجا که این رفتار امپدانی در تغییرات جریان و ولتاژ

1 - Valve Regulated Lead Acid Battery

با اندازه‌گیری مقادیر ولتاژ و جریان در فرکانس‌های کلیدزنی مختلف و استخراج مولفه اول تغییرات آن‌ها با استفاده از (۲) می‌توان مقدار امپدانس در هر فرکانس را بدست آورد. در این رابطه v_{ac}^1 و i_{ac}^1 به ترتیب مولفه اول تغییرات ولتاژ و جریان باتری می‌باشند.

$$Z_{Batt} = \frac{v_{ac}^1}{i_{ac}^1} \quad (2)$$

در استخراج مولفه اول سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بایستی بتوان علاوه بر مقدار دامنه اختلاف فاز آن‌ها را نیز نسبت به هم اندازه‌گیری کرد چرا که بدست آوردن مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس نیازمند مشخص بودن زاویه فاز امپدانس خواهد بود.



شکل ۵: سیستم مورد نیاز برای اندازه‌گیری امپدانس باتری

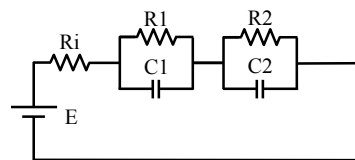


شکل ۶: دستگاه ساخته شده به منظور اندازه‌گیری امپدانس باتری.

در شکل ۶ تصویر دستگاه ساخته شده با ساختار شکل ۵ نشان داده شده است. این دستگاه با کنترل MOSFET های مورد استفاده، قادر است در حالت شارژ و یا دشارژ با قطع و وصل

رؤیت می‌باشد، ساختار مدل مورد استفاده برای باتری از دو مدار RC مانند شکل ۴ تشکیل می‌شود [۴] و [۵].

در شکل ۳ نشان داده شده است که قطر نیم دایره نمودار نایکوئیست امپدانس RC برابر با مقدار R می‌باشد به این ترتیب با استفاده از نمودار نایکوئیست امپدانس باتری مقدار مقاومت‌های R_1 و R_2 در مدار شکل ۴ بدست می‌آید.



شکل ۴: مدار معادل باتری.

در نمودار نایکوئیست امپدانس RC بیشترین مقدار موهومی در فرکانس ω_c مشخص شده است. این فرکانس که فرکانس مشخصه مدار RC نامیده می‌شود، با محاسبه نقطه اکسترمم تابع امپدانس یک مدار RC بر حسب فرکانس به صورت رابطه (۱) با مقادیر R و C ارتباط پیدا می‌کند.

به این ترتیب با توجه به نقطه اکسترمم هر کمان در منحنی نایکوئیست امپدانس باتری، فرکانس متناظر آن مشخص شده و به کمک مقدار مقاومت بدست آمده می‌توان مقدار خازن هر یک از امپدانس‌های RC را مشخص نمود.

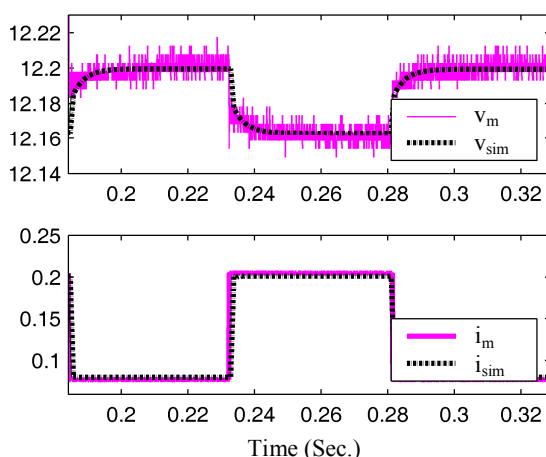
$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

محل تلاقی نمودار نایکوئیست با محور حقیقی مقدار مقاومت R_i مشخص شده در شکل ۴ را نتیجه می‌دهد و مقدار E نیز برابر با مقدار ولتاژ مدار باز باتری پس از یک زمان استراحت مناسب است که واکنش‌های الکتروشیمیایی باتری به تعادل رسیده باشند.

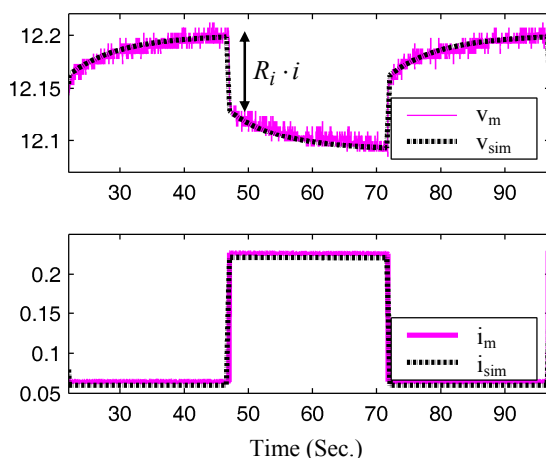
۴- روش اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری امپدانس باتری با توجه به [۲] و [۶] بایستی یک مولفه متناوب در ولتاژ و جریان باتری ایجاد نمود و با استفاده از (۲) مقدار امپدانس ظاهر شده را بدست آورد. از آنجا که مقدار امپدانس به فرکانس تغییرات جریان بستگی دارد نیاز به اعمال تغییرات در یک محدوده فرکانسی مشخص خواهد بود. این تغییرات جریان می‌تواند در حالت شارژ نیز با حضور منبع شارژ اعمال شود. در شکل (۵) چنین سیستمی ارائه شده است. در این سیستم با کنترل زمان قطع و وصل کلید S1 می‌توان به هدف مورد نظر دست یافت.

در یک محدوده فرکانسی مشخص مقدار قابل ملاحظه پیدا می-کند. این مسئله با بررسی شکل ۹ که ولتاژ و جریان در فرکانس ۲۰ mHz را نشان می‌دهد مشخص می‌گردد.

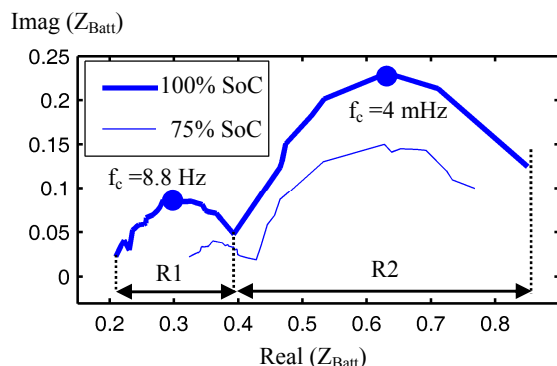


شکل ۸: ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱۰ Hz



شکل ۹: ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در فرکانس ۲۰ mHz

در شکل ۹ برخلاف شکل‌های ۷ و ۸، میزان شباهت تغییرات ولتاژ به تغییرات مربعی شکل که معرف امپدانس مقاومتی می‌باشد کمتر شده و رفتار خازنی با وضوح بیشتری قابل رویت است.



شکل ۱۰: نمودار نایکوئیست امپدانس اندازه‌گیری شده.

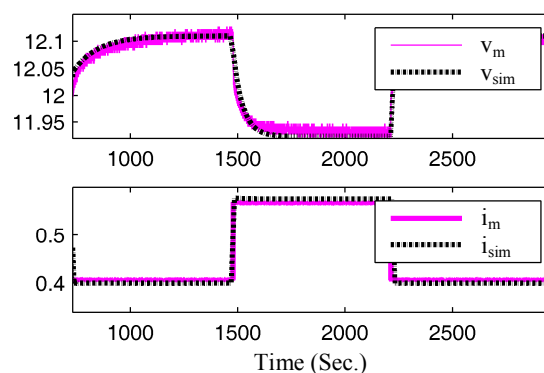
یک بار مقاومتی در جریان باتری نوسان ایجاد کند. محدوده فرکانس کلیدزنی مورد استفاده در این مقاله از ۱ میلی هرتز تا ۳۰۰ هرتز می‌باشد و زمان روشنی کلید ۵۰٪ می‌باشند.

علاوه بر انجام بارگیری پالسی، این دستگاه قادر است میزان انرژی و آمپر ساعت در حالت شارژ و دشارژ را نیز اندازه‌گیری کند. به این ترتیب با تنظیم مقدار دشارژ بر حسب آمپر ساعت مشخص می‌توان امپدانس را در سطوح شارژ مختلف اندازه‌گیری نمود.

به منظور استخراج مولفه اول تغییرات جریان و ولتاژ باتری بایستی بتوان از کمیت‌های مذکور داده برداری نمود و سپس با استفاده از اطلاعات نمونه برداری شده به محاسبه مقدار امپدانس پرداخت. برای این منظور از یک دستگاه نمونه بردار Advantech مدل USB4711 استفاده شده است که قادر به نمونه‌برداری با حداکثر نرخ ۱۰۰ ks/sec. برای ۸ کانال آنالوگ می‌باشد.

۵- نتایج اندازه‌گیری

با استفاده از دستگاه معرفی شده در قسمت ۴، امپدانس یک باتری VRLA، ۱۲ ولت، ۷ آمپر ساعت اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ و ۸ ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱ میلی هرتز و ۱۰ هرتز نشان داده شده است.



شکل ۱۱: ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱ mHz

در فرکانس‌های خیلی پایین مانند شکل ۷، تاخیر پاسخ ولتاژ نسبت به زمان طولانی پالس ناچیز است و رفتار مقاومتی، غالب می‌باشد. در این شکل V_m ولتاژ اندازه‌گیری شده و V_{sim} ولتاژ شبیه سازی شده است. در فرکانس‌های بالا مانند شکل ۸، کوتاه بودن عرض پالس مانع از تغییرات قابل توجه در ولتاژ می-گردد و شکل موج تغییرات ولتاژ به حالت مربعی نزدیک شده و امپدانس باتری به صورت مقاومتی ظاهر می‌گردد.

همانطور که در قسمت ۱ بررسی شد مقدار موهومی امپدانس در دو انتهای منحنی نایکوئیست دچار کاهش می‌شود و

مدل سازی باتری شناخت عملکرد باتری در تغییرات بار است تا بتوان استفاده مناسب و بهینه را از آن به عمل آورد. به عنوان نمونه با استفاده از مدل باتری، می توان زمان استراحت در شارژ پالسی را به گونه ای انتخاب نمود که خازن های C_1 و C_2 فرصت تخلیه پیدا کرده و به این ترتیب ولتاژ الکتروود در حد مجاز باقی بماند و با جلوگیری از فعال شدن واکنش های جانبی، راندمان شارژ نسبت به حالت شارژ پیوسته افزایش یابد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی عملکرد باتری ها به معرفی ماهیت امپدانس باتری ساختار و چگونگی مدل سازی آن پرداخته شد. همچنین با معرفی روش اندازه گیری امپدانس، نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی حاصل از اندازه گیری امپدانس یک باتری سرب اسید VRLA نشان داده شد. با بررسی اثر سطح شارژ بر امپدانس داخلی باتری ملاحظه شد که مقاومت داخلی باتری با کاهش سطح شارژ افزایش می یابد. این مسئله در شارژ یک بانک باتری سری باعث می شود ولتاژ قرار گرفته بر باتری ضعیف تر بزرگتر از ولتاژ باتری با سطح شارژ بالاتر باشد و این باعث افزایش سرعت الکتروولیز در باتری ضعیف تر شده و منجر به کاهش عمر مفید آن خواهد شد. از آنجا که افت ولتاژ در امپدانس داخلی باتری عامل محدود کننده جریان در حالت شارژ و دشارژ می باشد در بارگیری و شارژ پالسی می توان از رفتار خازنی باتری به گونه ای استفاده نمود که افت ولتاژ در یک مقدار مشخص محدود بماند.

مراجع

- [1] S. Buller, M. Thele, R. Doncker and E. Karden, "Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications," *IEEE TRANS. ON INDUSTRY APP.*, vol. 41, no. 3, pp. 742-746, May. 2005.
- [2] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries," *J. Power Sources*, vol. 70, no. 1, pp. 59-69, Jan. 1998.
- [3] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, No. 5, pp. 2550-2556, Oct. 2007.
- [4] S. Buller, "Impedance-based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems," Ph.D. dissertation, ISEA, RWTH Aachen, Aachen, Germany, 2003.
- [5] B. Schweighofer, K. M. Raab and G. Brasseur, "Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 4, pp. 1087-1091, Aug. 2003.
- [6] E. Barsoukov, J.R. MACDONALD (ed.): *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*. John Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-471-64749-7.

با تکرار اندازه گیری در فرکانس های مختلف در حالت شارژ کامل و سطح شارژ ۷۵٪ و استفاده از مقادیر امپدانس اندازه گیری شده نمودار نایکوئیست امپدانس در شکل ۱۰ رسم شده است. با استفاده از این نمودار و نتایج بدست آمده از شکل ۳، مقادیر مقاومت بلوک های RC به کمک شعاع کمان ها و مقدار مقاومت R_i از محل تلاقی محور حقیقی بدست می آید. مقدار C_1 و C_2 نیز با استفاده از مقدار f_c مشخص شده در شکل ۱۰ و رابطه (۱) مشخص می شود. در جدول ۱ مقادیر بدست آمده برای مدل شکل ۴ آمده است.

با توجه به نمودار شکل ۱۰ ملاحظه می شود با کاهش سطح شارژ مقاومت اهمی باتری افزایش می یابد. این افزایش مقاومت خود به عنوان یکی از شاخص های تعیین سطح شارژ مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۱: پارامترهای مدار معادل باتری.

سطح شارژ	C_2 (F)	R_2 (mOhm)	C_1 (F)	R_1 (mOhm)	R_i (mOhm)
٪۱۰۰	۸۰	۵۰۰	۰/۰۹	۲۰۰	۲۰۰
٪۷۵	۸۰	۳۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۳۲۰

اثر کاهش سطح شارژ باعث کاهش مقاومت های R_1 و R_2 که تعیین کننده قطر کمان های نمودار نایکوئیست هستند می شود. این کاهش به معنای کاهش تلفات در واکنش های جانبی مانند الکتروولیز آب می باشد که در اثر کاهش ولتاژ الکتروودها حاصل می شود [۴].

۶- شبیه سازی

به منظور بررسی صحت و اعتبار مدل بدست آمده، مدار مورد استفاده برای اندازه گیری، شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی در شکل های ۷، ۸ و ۹ به همراه نتایج اندازه گیری نشان داده شده است. با توجه به اینکه مدار R_2C_2 بیانگر امپدانس در فرکانس های پایین و مدار R_1C_1 تعیین کننده رفتار باتری در فرکانس های بالاتر است، می توان پارامترهای مدل بدست آمده را تنظیم نمود.

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است در لحظه افزایش جریان باتری، افت ولتاژ R_i در مقدار ولتاژ ایجاد می گردد و پس از آن افت ولتاژ در مقاومت های R_1 و R_2 با تأخیر ظاهر می شوند.

آنچه بایستی مورد توجه قرار بگیرد این است که هدف از