

شبیه سازی مبتنی بر امیدانس ابرخازن ها و باتری های لیتیوم یون برای کاربردهای الکترونیک قدرت

چکیده

برای پیش بینی عملکرد سیستم های الکترونیک قدرت مدرن، روش های طراحی مبتنی بر شبیه سازی استفاده می شود. این کار از روش طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی برای یافتن مدل های مدار معادل جدید ابرخازن ها و باتری های لیتیوم یون استفاده می کند.

اصطلاحات شاخص

باتری های لیتیوم یون (Li-ion)، مدل های شبیه سازی، ابرخازن ها (SCs).

مقدمه

روش های توسعه مبتنی بر شبیه سازی، برای کنار آمدن کامل با پیچیدگی های سیستم های الکترونیک قدرت مدرن در حال افزایش هستند. برای بکارگیری این روش ها، ارائه زیر مدل مناسب تمام اجزای سیستم الزامی است. با این حال در مقایسه با اکثر اجزاء برقی و الکترونیکی، مدل های دینامیکی دقیق دستگاه های ذخیره انرژی الکتروشیمیایی نادر هستند. بنابراین این مقاله روش طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی¹ را برای گسترش مدل های مدار معادل غیرخطی و مبتنی بر فیزیک ابرخازن ها² برای توصیف باتری های لیتیوم یون به کار می گیرد.

بخش زیر به طور خلاصه روش طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی را معرفی می کند و طیف امیدانس اندازه گیری شده را ارائه می دهد. از این طیف، مدل های مدار معادل مناسب استنباط می شوند. پس از این، پیاده سازی سیمولینک متلب مدل های شبیه سازی جدید مورد بحث قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی و همچنین اندازه گیری های تایید شده نیز ارائه گردیده است. در نهایت نتیجه گیری صورت گرفته و چشم انداز رویکردهای جدید مدل سازی مبتنی بر امیدانس ترسیم شده است.

II. طیف امیدانس ابرخازن ها و باتری های لیتیوم یون

¹ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

² Supercapacitors (SCs)

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را می توان در حالت گالوانوستاتیک^۳ یا پتانسیواستاتیک^۴ انجام داد. به دنبال رویکرد اول، یک جریان متناوب کوچک از طریق دستگاه ذخیره سازی مورد بررسی شارش می یابد و پاسخ ولتاژ ac آن اندازه گیری می شود. از طریق جریان ac و پاسخ ولتاژ ac اندازه گیری شده، امپدانس ذخیره سازی به صورت آنلاین با استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۵ تعیین می شود. یک جریان dc (شارژ یا دشارژ) که بر روی سیگنال تحریک سوار شده است، نقطه کار کلی سلول را مشخص می کند. به دلیل غیرخطی بودن بیشتر سیستم های ذخیره سازی الکتروشیمیایی به ویژه باتری ها، دیفرانسیل امپدانس $Z = dU/dI$ معمولاً برابر با ضریب U/I نیست.

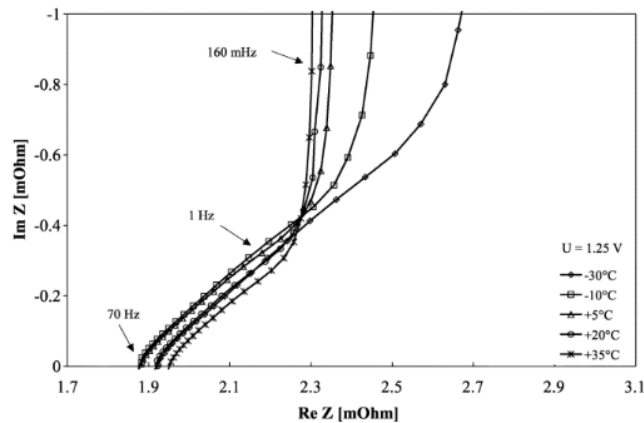
در این موارد، مدل سازی رفتار سیگنال بزرگ یک دستگاه ذخیره سازی انرژی نیازمند اندازه گیری امپدانس در چندین نقطه کاری و به دنبال آن یکپارچه سازی امپدانس دیفرانسیل با توجه به جریان، یعنی $U = \int Z(I_{dc}) dI_{dc}$ است؛ علاوه بر این، امپدانس دستگاه های ذخیره سازی معمولاً به دما و وضعیت شارژ بستگی دارد.

بنابراین مجموعه ای از طیف امپدانس ها باید به طور سیستماتیک تجزیه و تحلیل شود. با توجه به پدیده انتقال جرم، عملکرد دینامیک باتری در حین دشارژ یا شارژ پیوسته باتری ها به طور قابل توجهی با عملکرد آن در حین میکروسایکلینگ^۶ دینامیک با تغییرات مکرر بین شارژ و دشارژ متفاوت است. از آنجایی که مورد دوم برای بسیاری از کاربردهای عملی باتری (مانند وسایل نقلیه هیبریدی-الکتریکی یا وسایل نقلیه توقف/استارت) معمول است، EIS روی باتری های لیتیم یون با استفاده از یک تکنیک میکروسایکل خاص انجام شده است.

در طول بررسی ابرخازن ها، طیف امپدانس در چهار ولتاژ مختلف و پنج دما ثبت شده است. به عنوان مثال، شکل ۱ نمایش سطح پیچیده طیف امپدانس یک ابرخازن ۱۴۰۰ فاراد در $U = 1.25V$ را در یک محدوده فرکانسی ۷۰ هرتز تا ۱۶۰ مگاهرتز نشان می دهد. این محدوده فرکانسی مربوط به ثابت های زمانی معمول در اکثر کاربردهای توان بالا است؛ به عنوان مثال چرخش یک وسیله نقلیه دارای موتور احتراق.

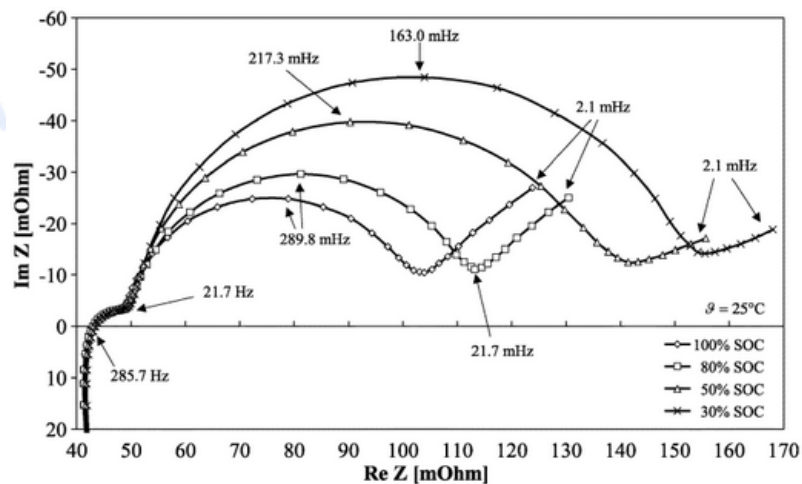
در محدوده فرکانسی بالا (فرکانس های بالاتر از ۷۰ هرتز)، ابرخازن ها رفتار القایی نشان می دهند. سپس تقریباً در $Re(Z) = 1.9 m\Omega$ نمودارهای امپدانس محور حقیقی را قطع می کنند. برای فرکانس های میانی، نمودارهای صفحه مختلط با محور حقیقی زاویه تقریباً ۴۵ تشکیل می دهند. این زاویه با نفوذ جریان محدود به ساختار متخلخل الکترودها توضیح داده می شود (که در [۲] مورد بحث قرار گرفته است). برای فرکانس های پایین تر، طیف ها به یک خط تقریباً عمودی در صفحه مختلط نزدیک می شوند که نمایانگر خازن ایده آل است.

³ galvanostatic
⁴ potentiostatic
⁵ DFT
⁶ microcycling



شکل ۱. نمودار صفحه مختلط طیف امپدانس یک ابرخازن ۱۴۰۰ فاراد تولید شده توسط Montena Components SA ، $U = 1.25 \text{ V}$

شکل ۲ طیف امپدانس اندازه‌گیری شده یک باتری لیتیوم یون (۳'۶ V/5 Ah, Saft LM 176065) را در دمای اتاق و در وضعیت شارژهای مختلف (در این مورد با جریان dc صفر) نشان می‌دهد. داده‌های امپدانس برای هشت فرکانس در هر بازه ده‌تایی فرکانسی که از ۶ کیلوهرتز شروع می‌شود، ثبت شده است. برای همه طیف‌ها، برخی از فرکانس‌های مشخصه داده شده‌اند. در تقریباً $Re(Z) \approx 42 \text{ m}\Omega$ تقاطع محور حقیقی طیف امپدانس مشاهده می‌شود. برای فرکانس‌های پایین‌تر، همه طیف‌ها دو نیم‌دایره خازنی را نشان می‌دهند. نیم‌دایره اول نسبتاً کوچک و اندکی فرورفته است، در حالی که دومی بزرگتر است و تقریباً فرورفته نیست. دایره دوم با کاهش وضعیت شارژ به طرز قابل توجهی رشد می‌کند.



شکل ۲. طیف امپدانس یک باتری لیتیوم یون، $I_{dc} = 0 \text{ A}$ ، $\theta = 25^\circ \text{ C}$

در نهایت در انتهای فرکانس پایین طیف‌های به تصویر کشیده شده، فرایند نفوذ قابل مشاهده می‌شود. امپدانس نفوذ یک شیب -45° را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از امپدانس واربرگ^۷ است. با توجه به شرایط مرزی برای انتشار یون‌های لیتیوم در الکترودها، شاخه نفوذ طیف به یک طیف امپدانس خازن مانند 90° - برای فرکانس‌های حتی پایین‌تر نزدیک می‌شود.

⁷ Warburg

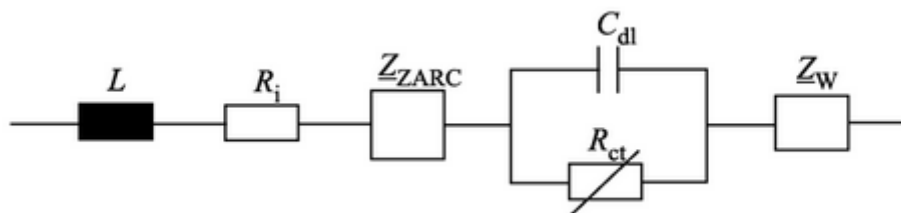
طیف امپدانس باتری‌های سرب اسیدی تنظیم‌شده با شیر^۸ با جریان‌های dc مختلف سوار بر هم نیز در چندین وضعیت شارژ^۹ و دما اندازه‌گیری شده‌است. این نتایج خارج از محدوده این مقاله است اما می‌توان آنها را در [۱] و [۴] یافت.

۱۱۱. مدل‌های مدار معادل

بحث توپولوژی مدل و اصل مدل‌سازی کلی در این بخش بر روی فناوری باتری لیتیوم یون متمرکز است. در مورد ابرخازن‌ها، تطبیق عالی با طیف امپدانس اندازه‌گیری‌شده، با استفاده از یک مدل شبکه‌نردبانی متشکل از مقاومت الکترولیت منفذی و خازن دو لایه غیرخطی الکتروود/الکترولیت خط‌مرزی به دست آمد. نتایج تفصیلی و همچنین نمایش عناصر توده‌ای شبکه‌نردبانی در [۱] و [۲] گزارش شده‌است.

برای مدل‌سازی طیف امپدانس گفته‌شده باید توپولوژی‌های مدار معادل مناسبی تعریف شوند. بر اساس فرآیندهای فیزیکی زیربنایی، مدارهای معادل باید امکان نمایش بهینه طیف‌های اندازه‌گیری‌شده را با حداقل مجموعه‌ای از پارامترهای مدل فراهم کنند. در مرحله دوم، پارامترهای مدل باید محاسبه شوند. برای به حداقل رساندن انحراف بین داده‌های مدل‌شده و طیف‌های اندازه‌گیری‌شده، یک الگوریتم مناسب حداقل مربع استفاده می‌شود.

در شکل ۳ مدار معادل الکتریکی یک باتری لیتیوم یون نشان داده شده‌است. این مدار از یک اندوکتانس L ، یک مقاومت اهمی R_i ، یک عنصر به نام Z_{ZARC} که نمایانگر یک نیم‌دایره فشرده در صفحه مختلط است، یک مدار غیرخطی RC (C_{dl} , R_{ct}) و همچنین از یک امپدانس واربورگ Z_W تشکیل شده‌است [۱]، [۳]. با استفاده از توپولوژی مدل به تصویر کشیده شده، رفتار ac مشاهده شده یک باتری لیتیوم یون را می‌توان با دقت توصیف کرد. انطباق مدل با طیف امپدانس اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که علی‌رغم چندین ساده‌سازی، تمام فرآیندهای مرتبط از جمله تخلخل، انتقال بار و انتشار با دقت کافی مدل‌سازی می‌شوند.

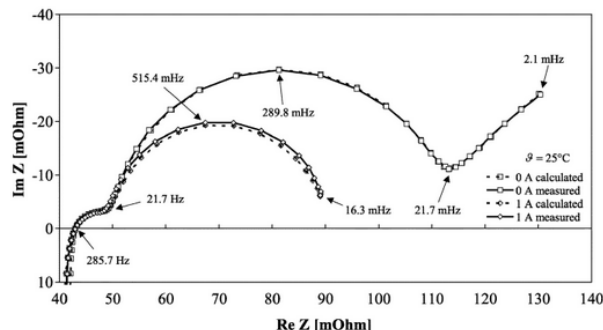


شکل ۳. مدل مدار معادل باتری لیتیوم یون.

⁸ VRLA

⁹ SOC

شکل ۴ داده‌های امپدانس اندازه‌گیری شده و محاسبه شده باتری لیتیوم یون در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و وضعیت شارژ ۸۰٪ را با هم مقایسه می‌کند. برای همه فرکانس‌ها و هر دو جریان dc نشان داده شده، منحنی‌های مربوطه تطابق تقریباً کاملی را نشان می‌دهند.



شکل ۴. نمودار امپدانس مختلط بر اساس داده‌های اندازه‌گیری و مدل سازی شده امپدانس باتری لیتیوم یون

در شارژ $\vartheta = 25^\circ C, 80\% SOC, I_{dc} = 0 A, I_{ac} = 1 A$

بدیهی است که قطر نیم‌دایره فرکانس پایین یعنی پارامتر R_{ct} به شدت به جریان dc که در حین اندازه‌گیری امپدانس سوار می‌شود، بستگی دارد. غیرخطی بودن R_{ct} و جریان dc در شکل ۵ نشان داده شده است. جدا از نقاط داده که از طیف امپدانس اندازه‌گیری شده تعیین شده اند، شکل ۵ نیز یک منحنی محاسبه شده را نشان می‌دهد که وابستگی جریان R_{ct} را مدل می‌کند.

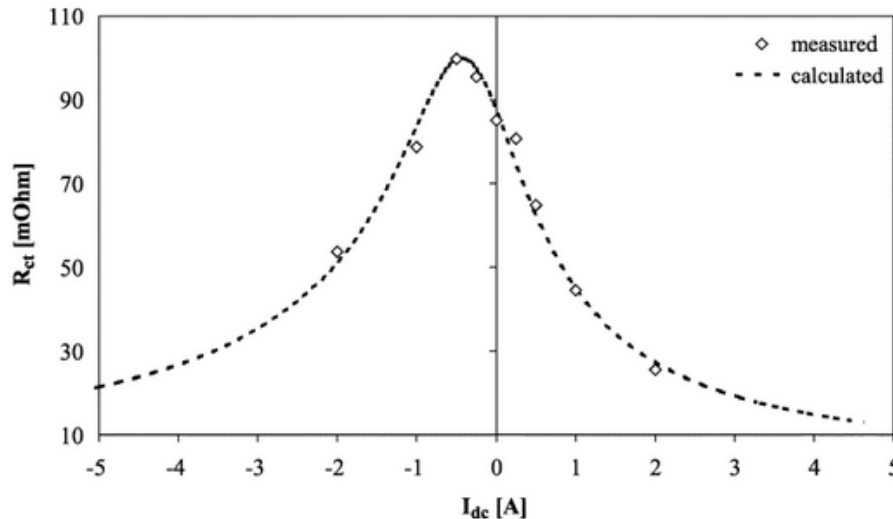
رابطه بین جریان I_{dc} و اضافه ولتاژ مربوطه η در عنصر امپدانس R_{ct} را می‌توان با یک معادله نوع بولتزمن توصیف کرد. در الکتروشیمی، این نوع معادله به معادله باتلر-ولمر (۱) معروف است. ثابت‌ها عبارتند از جریان مبادله I_0 ، تعداد بارهای اولیه منتقل شده n ، ضریب تقارن α ($0 \leq \alpha < 1$) و ولتاژ حرارتی $U_T = RT/F$ ($U_T \approx 26mV$ if $T = 298K$)

$$I = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{n \cdot \alpha \cdot \eta}{U_T}\right) - \exp\left(-\frac{n \cdot (1 - \alpha) \cdot \eta}{U_T}\right) \right) \quad (1)$$

مقاومت انتقال بار غیرخطی R_{ct} را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_{ct}(I) = \frac{\partial \eta}{\partial I} \quad (2)$$

معادله (۲) را می‌توان به صورت تحلیلی برای موارد خاص $\alpha = 0$ و $\alpha = 1$ (واکنش‌های برگشت‌ناپذیر) و $\alpha = 0.5$ (سینتیک متقارن) حل کرد. در تمام موارد دیگر محاسبه عددی مورد نیاز است. بنابراین برای تعیین پارامترهای باتلر-ولمر I_0 ، α و n از نقاط داده در شکل ۵، از یک الگوریتم مناسب دوم استفاده شده است.

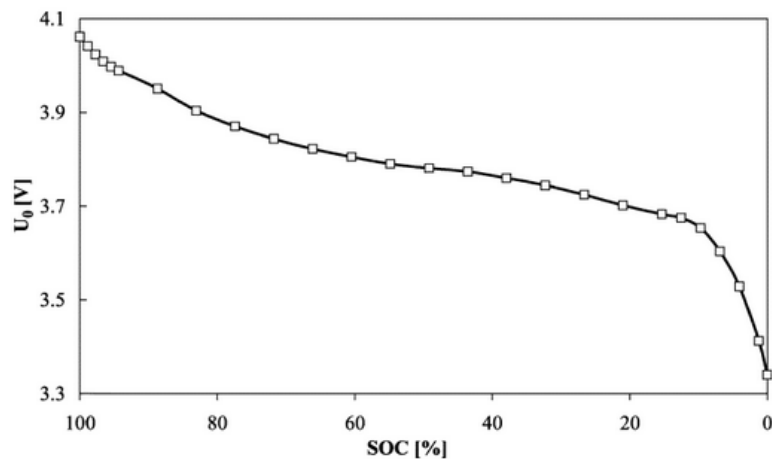


شکل ۵. غیر خطی بودن مقاومت R_{ct} ($I_{dc} = 0 \text{ A}$, $\theta = 25^\circ \text{ C}$)

بهترین تقریب از نقاط داده برای $I_0 = 0.45 \text{ A}$ ، $\alpha = 0.62$ و $n = 0.65$ است. برای واکنش‌های ردوکس کلاسیک، n نشان دهنده تغییر در تعداد اکسیداسیون یون‌های واکنش است؛ بنابراین برای n مقادیر صحیح مورد انتظار است.

با این حال برای باتری لیتیوم یون یک n با مقدار غیر صحیح بهتر بوده است. این نتیجه ممکن است با ماهیت خاص واکنش میان‌افزایی لیتیوم توجیه شود یا ممکن است به دلیل ساده‌سازی‌هایی باشد که برای اجازه دادن به پارامترسازی مدل شبیه‌سازی بدون اندازه‌گیری الکتروود مرجع ضروری است. بررسی الکتروشیمیایی این یافته برای توسعه بیشتر مدل باتری استاتیک مورد نیاز نیست و فراتر از محدوده این کار در نظر گرفته می‌شود. در نهایت شکل ۶ ولتاژ باتری مدار باز U_0 را به عنوان تابعی از وضعیت شارژ نشان می‌دهد. باتری لیتیوم یون تا حدی دشارژ شد و ولتاژ مدار باز پس از یک دوره استراحت حداقل پنج ساعته اندازه‌گیری شد. منحنی در شکل ۶ را می‌توان در یک جدول الکتریکی^{۱۰} ذخیره کرد.

¹⁰ lookup table

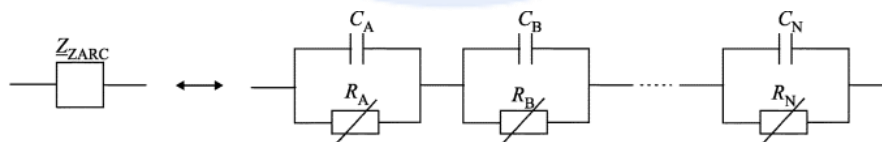


شکل ۶. ولتاژ مدار باز به عنوان تابعی از وضعیت شارژ (باتری لیتیوم یون)

IV. پیاده سازی مدل

تا کنون رفتار دینامیکی دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی مدل شده در حوزه فرکانس توصیف شده است. رفتار حوزه زمانی مدل مدار معادل را می‌توان با حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی محاسبه کرد. برای این محاسبه می‌توان از ابزارهای شبیه‌سازی مانند سیمولینک متلب استفاده کرد. با این حال، همه عناصر امپدانس پیچیده (به عنوان مثال عناصر ZARC و امپدانس‌های واربرگ) نمی‌توانند مستقیماً در یک ابزار شبیه‌سازی مدار مشترک پیاده‌سازی شوند. برای این عناصر ابتدا باید با استفاده از مدارهای RC یا توپولوژی‌های شبکه نردبانی RC تقریب‌های مناسب پیدا شود. [1]

به عنوان مثال ایده اصلی برای نمایش یک عنصر ZARC که برای مدل‌سازی یک نیم‌دایره فشرده و خازنی در نمودار صفحه مختلط به کار می‌رود، در شکل ۷ نشان داده شده است. تقریب، مبتنی بر اتصال سری مدارهای غیرخطی RC است. تمام مدارهای RC به طور کامل توسط پارامترهای عنصر ZARC تعیین می‌شوند. بنابراین تعداد پارامترهای آزمایشی ثابت می‌ماند. با افزایش تعداد مدارهای RC، تقریب عناصر ZARC بیشتر و دقیق‌تر می‌شود. با این حال، زمان محاسبه افزایش می‌یابد. بنابراین یک مصالحه مناسب بین دقت شبیه‌سازی و تلاش محاسباتی باید پیدا شود. این پرسش به طور کامل در [۱] مورد بحث قرار گرفته است.



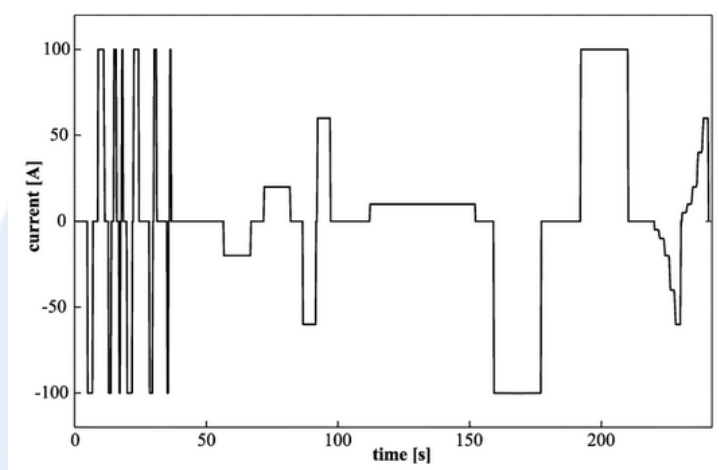
شکل ۷. تقریب یک عنصر ZARC توسط مدارهای RC

پارامترهای هر مدل که برای شبیه‌سازی یک باتری خاص مورد نیاز است در یک فایل جداگانه ذخیره می‌شود. برای اجازه دادن به انطباق خطی یک مدل باتری پارامتریزه شده با باتری‌های با اندازه متفاوت از همان فناوری، همه پارامترها با توجه به جریان اسمی باتری و تعداد سلول‌های باتری متصل به صورت سری تعریف می‌شوند. علاوه بر این به دلیل غیرخطی بودن برخی از عناصر امپدانس، جریان اصلی باتری در مدل شبیه‌سازی با جریان نسبی I/I_{in} جایگزین می‌شود.

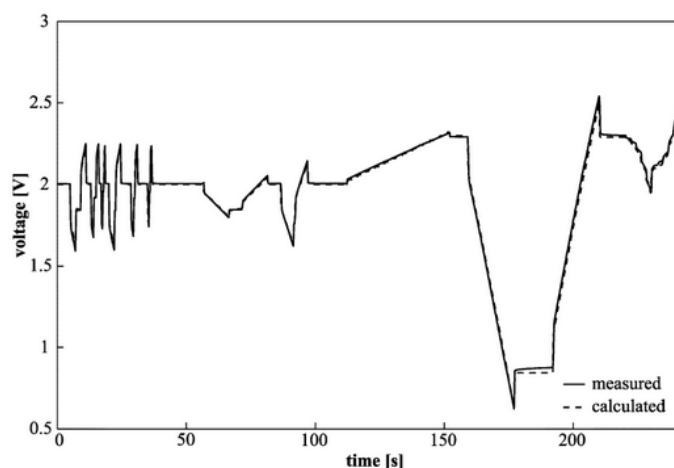
۷. راستی آزمایی و بکارگیری مدل ها

به عنوان آخرین قدم، نتایج مدل های شبیه سازی با داده های اندازه گیری شده در حوزه زمان مقایسه می شوند. هر دو مدل (هم مدل ابرخازن و همچنین مدل باتری لیتیوم یونی) به تفصیل تأیید شده اند. [1] در این بخش، چند نمونه از این اندازه گیری های مورد تأیید آورده شده است.

برای تأیید مدل ابرخازن، نمایه فعلی نشان داده شده در شکل ۸ استفاده شده است. [2] پالس های شارژ و دشارژ تحمیلی، یک بار بسیار دینامیک را در ابتدا و همچنین در دوره های شارژ و دشارژ عمیق تر در پایان ارزیابی، مدل سازی می کنند. منحنی های ولتاژ مربوطه در شکل ۹ نشان داده شده است. داده های اندازه گیری شده و محاسبه شده مطابقت عالی را نشان می دهند.



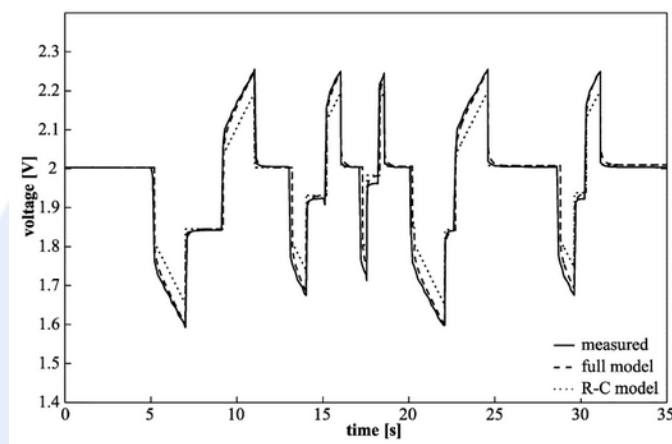
شکل ۸. نمایه جریان برای تأیید مدل ابرخازن



شکل ۹. پاسخ ولتاژ اندازه گیری و شبیه سازی شده به مشخصات جریان.

تأثیر ساختار متخلخل الکترودهای ابرخازن را می توان با مقایسه مدل شبیه سازی شده کامل و پاسخ ولتاژ مدل ساده شده که فقط از اتصال سری مقاومت اهمی R_i و ظرفیت C_{al} ابرخازن تشکیل شده است، نشان

داد. برای این مقایسه، شکل ۱۰ نمای بزرگ تری از اولین پالس‌های نمایه جریان تأیید شده ارائه می‌کند. بار دیگر، تطابق عالی ولتاژ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده آشکار می‌شود. علاوه بر این، انحرافات قابل توجهی به دلیل بی‌توجهی به تخلخل برای مدل ساده شده مشاهده می‌شود. برای زمان‌های آرام‌سازی^{۱۱} نسبتاً طولانی، با جایگزینی مقاومت اهمی R_i با مقاومت dc بزرگ‌تر $R_{dc} = R_i + R_{el}/3$ که مقاومت الکترولیت در منافذ الکترودها است، بر این انحرافات می‌توان غلبه کرد. [2] با این حال در این مورد، انتقالات سریع ولتاژ دیگر به خوبی نشان داده نمی‌شوند. یکی از مزیت‌های ابرخازنهایی که به‌عنوان دستگاه ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شوند، راندمان انرژی خوب آنها است. این راندمان تحت تأثیر ساختار متخلخل الکترودها نیز قرار می‌گیرد؛ به این معنی که افزایش بخش حقیقی امپدانس با کاهش فرکانس باید در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰: مقایسه پاسخ ولتاژ اندازه‌گیری شده و داده‌های به دست آمده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی.

برای مقایسه داده‌های راندمان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، یک ابرخازن به‌طور محدود با جریان‌های dc ثابت و با دامنه‌های مختلف، شارژ و دشارژ می‌شود. عمق چرخه $\pm 540 A.s$ انتخاب می‌شود که تقریباً با $\pm 15\% Q_{sc}$ مطابقت دارد. برای هر دامنه جریان، چرخه شارژ/دشارژ ده بار تکرار می‌شود؛ اما فقط از پنج سیکل آخر که در شرایط داخلی یکسان (شبه ثابت) شروع و پایان می‌یابند، برای محاسبه راندمان استفاده می‌شود. در مرحله دوم، با مشخصات کنونی ولی با استفاده از مدل خازن جدید و توسعه یافته، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. داده‌های راندمان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در جدول 1 مقایسه شده‌اند. مجدداً تطبیق بسیار خوبی مشاهده می‌شود.

I/A	10	20	40	60	80	100
Meas. eff.	96.8 %	94.2 %	88.8 %	83.8 %	79.2 %	74.7 %
Simul. eff.	97.1 %	94.4 %	89.0 %	84.0 %	79.3 %	74.8 %

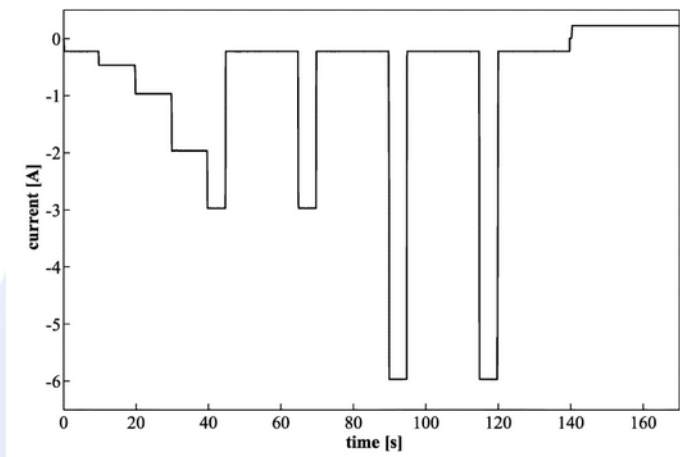
جدول ۱: مقایسه داده‌های راندمان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده. نقطه کار: $5^{\circ}C$ ولت، دمای اتاق، عمق چرخه تقریباً $\pm 15\% Q_{sc}$

¹¹ relaxation

در ادامه یک نمونه شبیه سازی از مدل باتری لیتیوم یون ارائه شده است. برای تأیید مدل، نمایه دشارژ جریان دینامیکی که در شکل ۱۱ نشان داده شده، انتخاب شده است. مقایسه پاسخ ولتاژ شبیه سازی و اندازه گیری شده به این نمایه جریان در وضعیت شارژ ۵۷٪ و دمای اتاق در شکل ۱۲ نشان داده شده است. منحنی های ولتاژ اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مطابقت بسیار خوبی دارند. دقت فوق العاده مدل شبیه سازی به دلیل نمایش دقیق امپدانس مختلط باتری که شامل تمام اجزا غیرخطی مهم است، می باشد.

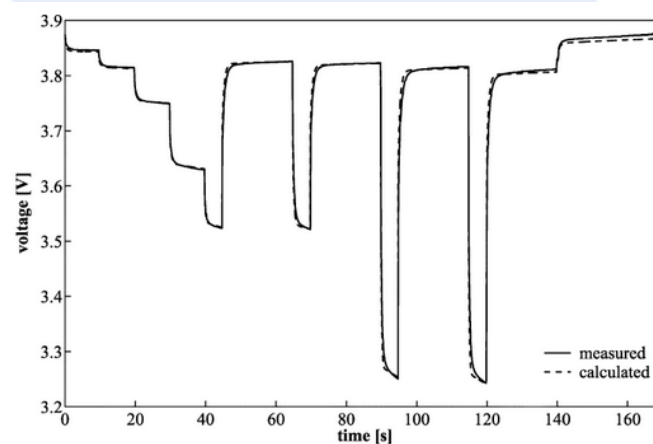
یک پیش شرط مهم برای کیفیت بالای نتایج شبیه سازی، تکرارپذیری^{۱۲} تقریباً کامل رفتار باتری در حین کار و همچنین عدم وجود واکنش های مداخله گر است. از این منظر باتری های لیتیوم یون به طور ویژه برای هر نوع

مدل سازی مناسب با باتری های لیتیوم باتری های اسید به نظر می رسد. با شبیه سازی می تواند با موفقیت سازگار شود. [۱]، [۴]



توصیف مبتنی بر هستند. در مقایسه یون، شبیه سازی سرب بسیار دشوارتر این وجود، رویکرد توصیف شده نیز با این فناوری باتری

شکل ۱۱. مشخصات جریان برای تأیید مدل باتری لیتیوم یون.



شکل ۱۲. پاسخ ولتاژ اندازه گیری و شبیه سازی شده باتری لیتیوم یون ($77.5\% SOC, 25^{\circ}C$)

¹² reproducibility

نتیجه گیری و چشم اندازهای آینده

این مقاله نشان می‌دهد که مدل‌های مدار معادل غیرخطی و فشرده، الزامات دقت را برای شبیه‌سازی دستگاه‌های ذخیره انرژی برآورده می‌کنند. برای نشان دادن قدرت این مفهوم مدل‌سازی، باتری‌های لیتیوم یون و ابرخازن‌ها انتخاب شده است. برای تعیین توپولوژی‌های مدار معادل مناسب و همچنین برای تعیین پارامتر این مدل‌ها، از روش EIS استفاده می‌شود. پس از پیاده‌سازی مدل‌ها، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی مقایسه شد. تطابق عالی بین داده‌های ولتاژ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده یافت شد.

با توجه به تطبیق‌پذیری مدل‌سازی مبتنی بر امپدانس به‌طور کلی، مفهوم توصیف شده می‌تواند برای سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی، به عنوان مثال باتری‌های نیکل هیدرید فلز یا حتی پشته‌های سلول سوختی در آینده نیز مورد استفاده قرار گیرد.

این تطبیق‌پذیری امکان شبیه‌سازی ترکیبی دستگاه‌های ذخیره انرژی مختلف را برای ارزیابی مفاهیم جدید هیبریداسیون ذخیره‌سازی فراهم می‌کند. علاوه بر این با استفاده از سایر زیر مدل‌سازی‌ها، به عنوان مثال توصیف انتقال جرم در باتری‌های VRLA، محدوده مجاز مدل‌های موجود را می‌توان افزایش داد. با این کار، شبیه‌سازی دوره‌های شارژ یا دشارژ با جریان ثابت طولانی مدت امکان‌پذیر خواهد شد.

یکی دیگر از کاربردهای جالب مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر امپدانس در آینده، طراحی دقیق باتری حرارتی است. همه مکانیسم‌های تولید گرما در ابرخازن‌ها یا باتری‌ها را می‌توان به طور دقیق نشان داد. همراه با مکانیسم‌های انتقال و اتلاف گرما، رفتار حرارتی باتری‌ها را نیز می‌توان شبیه‌سازی کرد. در نتیجه تأثیر آتی خنک‌کننده‌های مختلف (به عنوان مثال تأثیر بر هزینه‌های چرخه عمر) می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد.

تصدیق

نویسندگان از مرکز تحقیقات فورد آخن (FFA) به ویژه از دکتر D. Kok و دکتر L. Gaedt برای حمایت از این پروژه تحقیقاتی سپاس‌گزاری می‌کنند.



دفتر مرکزی: بوشهر، چهارراه ولیعصر، ساختمان ولیعصر، طبقه دوم، واحد ۴

۰۷۷۳۳۳۳۳۶۷۰

۰۷۷۳۳۳۲۹۵۴۰

SAYNACO.COM

SAYNACOMPANY

SUPPORT@SAYNACO.COM