

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

ابرخازن

منبع ذخیره انرژی الکتریکی آینده

دکتر مجید زندی

۱۳۹۴

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	هفت
فصل ۱. مقدمه‌ای بر ابرخازن‌ها در سیستم‌های الکتریکی هیبریدی (EHS).....	۱
۱.۱. مقدمه و تاریخچه.....	۱
۲.۱. سیستم‌های الکتریکی هیبریدی.....	۴
۱.۲.۱. استفاده از منابع ذخیره انرژی در سیستم‌های EHS.....	۶
۳.۱. ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شبکه قدرت الکتریکی.....	۸
۱.۳.۱. اهمیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی.....	۹
۲.۳.۱. روش‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی.....	۱۰
۴.۱. مقایسه باتری و ابرخازن.....	۱۹
۱.۴.۱. روش‌های ذخیره انرژی در ابرخازن‌ها و باتری‌ها.....	۲۰
۲.۴.۱. فرایندهای فارادی و غیرفارادی.....	۲۱
۳.۴.۱. چگالی بار ذخیره‌شده.....	۲۲
۴.۴.۱. چگالی انرژی.....	۲۳
۵.۴.۱. منحنی شارژ و دشارژ باتری و ابرخازن.....	۲۳
۶.۴.۱. ولتاژتوری چرخه‌ای.....	۲۶
۵.۱. تولید پراکنده و تولید متمرکز.....	۲۹
۶.۱. منابع.....	۳۳
فصل ۲. کاربردهای ابرخازن.....	۳۷
۱.۲. مقدمه.....	۳۷
۲.۲. ابرخازن.....	۳۷
۱.۲.۲. انواع ابرخازن.....	۳۷
۲.۲.۲. ابرخازن دولایه الکتروشیمیایی.....	۳۹
۳.۲. کاربردهای ابرخازن.....	۳۹
۱.۳.۲. کاربرد ابرخازن در بخش‌های صنعتی و منابع تغذیه الکترونیکی.....	۴۰
۲.۳.۲. کاربرد ابرخازن در سیستم‌های حمل‌ونقل.....	۴۸
۳.۳.۲. کاربرد ابرخازن در صنعت نظامی.....	۵۲

.....	۴.۳.۲. کاربرد ابرخازن در بخش‌های پزشکی	۵۵
.....	۴.۲. منابع	۵۷
.....	فصل ۳. ساختار ابرخازن دولایه الکتروشیمیایی (EDLC)	۵۹
.....	۱.۳. مقدمه	۵۹
.....	۲.۳. الکتروود	۵۹
.....	۱.۲.۳. الکتروودهای اکسایشی-کاهشی	۶۰
.....	۲.۲.۳. الکتروودهای کربنی	۶۳
.....	۳.۲.۳. الکتروودهای کامپوزیتی	۷۲
.....	۳.۳. الکتروولیت	۷۳
.....	۱.۳.۳. الکتروولیت آبی	۷۴
.....	۲.۳.۳. الکتروولیت آلی	۷۴
.....	۳.۳.۳. الکتروولیت مایعات یونی	۷۶
.....	۴.۳.۳. الکتروولیت جامد بسیاری	۷۶
.....	۴.۳. جداکننده	۷۷
.....	۵.۳. محفظه	۷۸
.....	۶.۳. نتیجه	۷۹
.....	۷.۳. منابع	۷۹
.....	فصل ۴. مدل‌سازی ابرخازن دولایه	۸۳
.....	۱.۴. مقدمه	۸۳
.....	۲.۴. مدل‌سازی مداری ابرخازن دولایه	۸۳
.....	۱.۲.۴. ابرخازن و مقاومت‌های پخشی	۸۴
.....	۲.۲.۴. مدل سری RC	۸۷
.....	۳.۲.۴. مدل دوشاخه	۸۷
.....	۴.۲.۴. مدل کلاسیک	۹۰
.....	۵.۲.۴. مدل مداری سه‌شاخه	۹۳
.....	۶.۲.۴. مدل الکتروودهای متخلخل به‌عنوان خطوط (مسیرهای) انتقال	۹۵
.....	۷.۲.۴. نتیجه مدل‌سازی مداری	۱۰۱
.....	۳.۴. مدل‌سازی فیزیکی ابرخازن دولایه	۱۰۲
.....	۱.۳.۴. مدل‌ها و مکانیزم‌های فعال‌سازی	۱۰۲
.....	۲.۳.۴. بسپارهای الکترواکتیو و نیاز به عملگرهای دوربرد	۱۰۶
.....	۳.۳.۴. تئوری نفوذ	۱۰۶

۱۰۷.....	۴.۳.۴. مدل‌های دولایه الکتروشیمیایی
۱۲۰.....	۵.۳.۴. مدل تحلیلی حفره
۱۲۳.....	۶.۳.۴. نتیجه مدل‌سازی فیزیکی
۱۲۵.....	۴.۴. منابع
فصل ۵. طراحی، شبیه‌سازی و محاسبه ظرفیت ابرخازن با تغییر پارامترها..... ۱۲۹	
۱۲۹.....	۱.۵. مقدمه
۱۳۰.....	۲.۵. کاربرد مواد نانوحفره در ابرخازن
۱۳۳.....	۳.۵. کاربرد نانوسیم‌ها در ابرخازن
۱۳۵.....	۴.۵. نانوکامپوزیت‌ها و کاربرد آن‌ها در ابرخازن
۱۳۹.....	۵.۵. نانو ابرخازن
۱۴۰.....	۶.۵. بررسی دقیق‌تر ظرفیت نانو ابرخازن بر اساس مدل هوانگ
۱۴۰.....	۱.۶.۵. مدل‌سازی فیزیک رفتار ابرخازن
۱۴۸.....	۲.۶.۵. نحوه حرکت مولکول‌های حلال و حل‌شونده‌ها
۱۴۹.....	۳.۶.۵. نانوحفره‌های کربنی چنداندازه‌ای
۱۵۱.....	۴.۶.۵. ابرخازن‌های متشکل از نانولوله‌های باز و بسته
۱۵۲.....	۷.۵. شبیه‌سازی ابرخازن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بر اساس مدل هوانگ
۱۵۶.....	۱.۷.۵. طراحی مقدماتی تکمیلی
۱۵۹.....	۲.۷.۵. طراحی نهایی
۱۶۳.....	۸.۵. منابع
فصل ۶. دستور کار ساخت نمونه آزمایشگاهی ابرخازن دولایه الکتروشیمیایی..... ۱۶۵	
۱۶۵.....	۱.۶. مقدمه
۱۶۶.....	۲.۶. تجهیزات و نحوه تست
۱۶۷.....	۱.۲.۶. باتری آنالایزر (گالوانواستات / پتانسیواستات)
۱۷۳.....	۲.۲.۶. روش محاسبه ظرفیت ابرخازن
۱۷۴.....	۳.۶. فناوری‌های برگزیده
۱۷۴.....	۱.۳.۶. ابرخازن حالت مایع بر پایه نانولوله کربنی
۱۸۲.....	۲.۳.۶. ابرخازن حالت جامد بر پایه الکترودهای لایه‌نازک
۱۸۷.....	۳.۳.۶. میکرو ابرخازن حالت جامد بر پایه MnO_2/Au
۱۹۰.....	۴.۶. دستور کار آزمایشگاهی برای راستی‌آزمایی دانش فنی
۱۹۰.....	۱.۴.۶. مواد اولیه و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت و تست نمونه آزمایشگاهی
۱۹۴.....	۲.۴.۶. دستور کار ساخت و تست ابرخازن حالت جامد بر پایه CNT

۱۹۶.....	دستور کار ساخت و تست ابرخازن‌های حالت مایع بر پایه CNT
۲۰۳.....	بهینه‌سازی ساخت ابرخازن‌ها بر پایه الکترودهای پوشش‌دهی‌شده کربنی
۲۰۳.....	مروری بر فناوری لایه‌نشانی
۲۱۲.....	بررسی پایداری کارایی ابرخازن
۲۱۴.....	منابع
۲۱۷.....	واژه‌نامه فارسی-انگلیسی
۲۲۳.....	واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
۲۲۹.....	نمایه

بیشگفتار

از ابتدای قرن اخیر میلادی و به دلیل ملاحظه‌های فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی، سهم تولید پراکنده انرژی الکتریکی، به‌ویژه با استفاده از منابع اولیه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی و بادی، در سبد جهانی تولید برق چند برابر شده است.

امروزه هیبریدکردن منابع تولید انرژی الکتریکی با منابع ذخیره انرژی الکتریکی در روش تولید پراکنده و انتخاب نوع منابع در کاربردهای موردنظر با نگرش به مقوله‌های فنی و اقتصادی، یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های محققان حوزه انرژی است. در سال‌های اخیر استفاده از ابرخازن‌ها به‌عنوان جدیدترین فناوری ذخیره انرژی الکتریکی در برابر فناوری‌های قدیمی‌تر همچون باتری‌ها و چرخ‌طیار^۱ به‌صورت جدی‌تری مطرح شده است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت و در نتیجه قابلیت اطمینان پایین منابع اولیه پاک و تجدیدپذیر انرژی، استفاده از ابرخازن‌ها به‌عنوان ابزار با کارایی بسیار بالا در ذخیره‌سازی انرژی و در تبدیل آن به انرژی مصرفی در پروفیل بار انکارناپذیر است. کارایی بسیار بالای ابرخازن‌ها در مقایسه با باتری ناشی از مزیت‌های اصلی آن‌ها شامل طول عمر بیشتر، زمان سریع‌تر شارژ و دشارژ و چگالی توان بسیار بالاتر است. لذا شناخت هرچه کامل‌تر و علمی‌تر انواع فناوری‌های ابرخازن‌ها به انتخاب صحیح‌تر منابع ذخیره انرژی الکتریکی در انواع سیستم‌های هیبریدی انرژی الکتریکی منجر خواهد شد.

با توجه به اهمیت ابرخازن‌ها، به‌عنوان یکی از جدیدترین فناوری ذخیره انرژی الکتریکی، نگارش این کتاب بر اساس آخرین یافته‌ها و دستاوردها در این زمینه، گامی نوین در پیشرفت بیشتر فنی و اقتصادی سیستم‌های هیبرید انرژی الکتریکی است، انجام شده است.

آنچه در این کتاب آورده شده، مواردی است که به آگاهی مهندسان و محققان این حوزه برای نگرشی نو به مقوله ذخیره‌سازی انرژی کمک خواهد کرد. موارد ارائه‌شده در فصل‌های این کتاب

1. Flywheel

برای افزایش توانمندی دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته‌های مهندسی انرژی، مهندسی برق، مهندسی فیزیک و شیمی در یادگیری بهتر دروس ارائه‌شده‌ی مربوطه پیشنهاد می‌شود. مطالب کتاب و روند محاسبه‌ها و طراحی‌های لازم در تمامی فصل‌ها از ابتدا تا انتهای آن به‌هم‌پیوستگی لازم را داراست. این امر باعث می‌شود این کتاب از سویی مرجعی مناسب جهت یادگیری مفاهیم ابرخازن‌ها باشد و از سویی دیگر ساخت نمونه‌هایی از ابرخازن را ممکن می‌سازد.

در تهیه و انتشار این کتاب از همکاری و مساعدت‌های همکاران گرامی خود بهره‌مند بوده‌ام و بدین‌وسیله بر زحمات آن‌ها ارج می‌نهم.

از مسئولان انتشارات دانشگاه شهید بهشتی که امکان آماده‌سازی و انتشار کتاب را فراهم آورده‌اند، تشکر می‌کنم. هم‌چنین از دوستان و همکاران عزیزم جناب آقایان دکتر رضا قادری، دکتر مجید نیک‌روش و دکتر حسین کرمانیان که از حمایت‌های معنوی ایشان برخوردار بوده‌ام، سپاسگزارم. از سرکار خانم دکتر لیلا شکاری، آقای دکتر مهدی غلام‌پور، خانم سمانه صالحی، خانم مهندس لادن پیروی، آقای مهندس میلاد بهرامی و آقای مهندس سلمان بحرانی که برای تدوین فصل‌های ابتدایی کتاب زحمات فراوانی کشیده‌اند و از آقای دکتر محمدرضا قآنی که ویرایش فنی و زبانی کتاب را با نهایت دقت و ظرافت انجام داده‌اند سپاسگزارم. هم‌چنین مراتب قدردانی خود را از دوستان و همکاران گرامی سرکار خانم دکتر رقیه گوگ‌ساز قوچانی، سرکار خانم دکتر مریم امیرحسینی و آقای دکتر علیرضا پیمان که در تدوین فصل‌های انتهایی کتاب زحمات فراوانی کشیده‌اند، ابراز می‌دارم. از آقای مهندس ابوالقاسم مسیبی و آقای مهرزاد خادمیان که در تمامی مراحل تهیه‌ی این کتاب تلاش فراوان کرده‌اند، کمال تشکر را دارم. در نهایت از همه‌ی کارکنان انتشارات دانشگاه که کارهای آماده‌سازی و چاپ را به سرانجام رساندند قدردانی و برای همه‌ی این همکاران گرامی سلامتی و موفقیت آرزو دارم. امیدوارم خوانندگان محترم کتاب نقطه‌نظرهای خود را از طریق پست الکترونیکی m_zandi@sbu.ac.ir به اطلاع نویسنده برسانند.

مجید زندی

زمستان ۱۳۹۴