

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ابرخازن

منبع ذخیره انرژی الکتریکی آینده

دکتر مجید زندی

www.ketab.ir

۱۳۹۴



۶۰۰

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

ابرخازن؛ منبع ذخیره انرژی الکتریکی آینده

دکتر مجید زندی

ویراستار: محمدرضا قآنی

حروفنگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان

طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی

ناظر چاپ: صفر ممیزاد

چاپ اول: ۱۳۹۴

شمارگان: ۱۰۰۰

قیمت: ۱۲۵۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

شماره کنگره:	۱۳۹۴ الف ۲۸۷۲ ز
شماره دیوبی:	۱۳۹۴ الف ۶۳۱۵ ز
پدیدآور(ان):	مجید زندی
تئالگان:	۱. دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
عنوان:	ابرخازن؛ منبع ذخیره انرژی الکتریکی آینده
فروست:	انتشارات دانشگاه شهید بهشتی؛ ۶۰۰
موضوع:	۱. خازن‌ها. ۲. برق نیرو.
محل نشر:	تهران
ناشر:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
سال نشر:	۱۳۹۴
شابک مجموعه:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۳۳۹۲
مشخصات ظاهری:	هشت، ۲۳۲ص:، مصور، جدول، نمودار

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.pub.sbu.ac.ir
unipress@mail.sbu.ac.ir

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
۳.۱. استفاده از منابع ذخیره انرژی در سیستم‌های EHS.....	۶
۳.۱.۱. ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شبکه قدرت الکتریکی.....	۸
۳.۱.۲. اهمیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی.....	۹
۳.۱.۳. روش‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی.....	۱۰
۴.۱. مقایسه باتری و ابرخازن.....	۱۹
۴.۱.۱. روش‌های ذخیره انرژی در ابرخازن‌ها و باتری‌ها.....	۲۰
۴.۱.۲. فرایندهای فارادی و غیرفارادی.....	۲۱
۴.۱.۳. چگالی بار ذخیره‌شده.....	۲۲
۴.۱.۴. چگالی انرژی.....	۲۳
۵.۴.۱. منحنی شارژ و دشارژ باتری و ابرخازن.....	۲۳
۶.۴.۱. ولتاژ و چرخه‌های.....	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 حمل و نقل.....	۴۸
۳.۳.۲. کاربرد ابرخازن در صنعت نظامی.....	۵۲

۴.۳.۲. کاربرد ابرخازن در بخش‌های پزشکی.....	۵۵
۴.۳. 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. الکتروودهای.....	۷۳
۱.۳.۳. الکتروولیت آبی.....	۷۴
۲.۳.۳. الکتروولیت آلی.....	۷۴
۳.۳.۳. الکتروولیت مایع.....	۷۶
۴.۳.۳. الکتروولیت جامد.....	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 پخش.....	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

۴.۳.۴. مدل های دولایه الکتروشیمیایی.....	۱۰۷
۵.۳.۴. مدل تحلیلی حفره.....	۱۲۰
۶.۳.۴. نتیجه مدل سازی فیزیکی.....	۱۲۳
۴.۴. منابع.....	۱۲۵
فصل ۵. طراحی، شبیه سازی و محاسبه ظرفیت ابرخازن با تغییر پارامترها.....	۱۲۹
۱.۵. مقدمه.....	۱۲۹
۲.۵. کاربرد مواد نانوحفره در ابرخازن.....	۱۳۰
۳.۵. کاربرد نانوسیم ها در ابرخازن.....	۱۳۳
۴.۵. نانویوزها و کاربرد آنها در ابرخازن.....	۱۳۵
۵.۵. نواحی خازن.....	۱۳۹
۶.۵. بررسی دقیق تر ظرفیت نانو ابرخازن بر اساس مدل هوانگ.....	۱۴۰
۱.۶.۵. مدل سازی رفتار ابرخازن.....	۱۴۰
۲.۶.۵. نحوه ساخت مسطحه های حلال و حل شونده ها.....	۱۴۸
۳.۶.۵. نانوحفره های کربنی چند اندازه ای.....	۱۴۹
۴.۶.۵. ابرخازن های متشکل از نانوله های باز و بسته.....	۱۵۱
۷.۵. شبیه سازی ابرخازن با استفاده از نرم افزار MATLAB بر اساس مدل هوانگ.....	۱۵۲
۱.۷.۵. طراحی مقدماتی تکمیلی.....	۱۵۶
۲.۷.۵. طراحی نهایی.....	۱۵۹
۸.۵. منابع.....	۱۶۳
فصل ۶. دستور کار ساخت نمونه آزمایشگاهی ابرخازن دولایه "کربن شیمیایی".....	۱۶۵
۱.۶. مقدمه.....	۱۶۵
۲.۶. تجهیزات و نحوه تست.....	۱۶۶
۱.۲.۶. باتری آنالایزر (گالوانواستات/ پتانسیواستات).....	۱۶۷
۲.۲.۶. روش محاسبه ظرفیت ابرخازن.....	۱۷۳
۳.۶. فناوری های برگزیده.....	۱۷۴
۱.۳.۶. ابرخازن حالت مایع بر پایه نانولوله کربنی.....	۱۷۴
۲.۳.۶. ابرخازن حالت جامد بر پایه الکترودهای لایه نازک.....	۱۸۲
۳.۳.۶. میکرو ابرخازن حالت جامد بر پایه MnO_2/Au	۱۸۷
۴.۶. دستور کار آزمایشگاهی برای راستی آزمایی دانش فنی.....	۱۹۰
۱.۴.۶. مواد اولیه و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت و تست نمونه آزمایشگاهی.....	۱۹۰
۲.۴.۶. دستور کار ساخت و تست ابرخازن حالت جامد بر پایه CNT.....	۱۹۴

- ۳.۴.۶. دستور کار ساخت و تست ابرخازن‌های حالت مایع بر پایه CNT..... ۱۹۶
- ۴.۴.۶. بهینه‌سازی ساخت ابرخازن‌ها بر پایه الکترودهای پوشش‌دهی‌شده کربنی..... ۲۰۳
- ۵.۴.۶. مروری بر فناوری لایه‌نشانی..... ۲۰۳
- ۶.۴.۶. بررسی پایداری کارایی ابرخازن..... ۲۱۲
- ۵.۶. منابع..... ۲۱۴

- واژه‌نامه فارسی-انگلیسی..... ۲۱۷
- واژه‌نامه انگلیسی-فارسی..... ۲۲۳
- نمایه..... ۲۲۹

www.ketab.ir

پیشگفتار

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 سده بیستم جهانی تولید برق چند برابر شده است.

امروزه هیبرید کردن منابع تولید انرژی الکتریکی با منابع ذخیره انرژی الکتریکی در روش تولید پراکنده و انتخاب نوع منبع، 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 ابزاری با کارایی بسیار بالا در ذخیره‌سازی انرژی و در تبدیل آن به انرژی الکتریکی در پروفیل بار انکارناپذیر است. کارایی بسیار بالای ابرخازن‌ها در مقایسه با باتری ناشی از مزایای آنها، 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

برای افزایش توانمندی دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته‌های مهندسی انرژی، مهندسی برق، مهندسی فیزیک و شیمی در یادگیری بهتر دروس ارائه‌شده مربوطه پیشنهاد می‌شود. مطالب کتاب و روند محاسبات و طراحی‌های لازم در تمامی فصل‌ها از ابتدا تا انتهای آن به هم پیوستگی 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 بدیهه‌سیله بر زحمات آن‌ها ارج می‌نهم.

از مسئولان نشریات 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 رحمت 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 تهیه این کتاب تلاش فراوان کرده‌اند، کمال تشکر را دارم. در نهایت از همه کارکنان انتشارات دانشگاه که بارها آماده‌سازی و چاپ را به سرانجام رساندند قدردانی و برای همه این همکاران گرامی سلامتی و رفاه 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