



سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند

تألیف

سیدمسعود مقدس تفرشی

عضو هیئت علمی دانشگاه گیلان

انتشارات دانشگاه گیلان

۱۳۹۸



شابک: ۸-۱۸۲-۱۵۳-۶۰۰-۹۷۸

سرشناسه	: مقدس تفرشی، مسعود، ۱۳۴۰ -
عنوان و نام پدیدآور	: سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند/ تألیف سیدمسعود مقدس تفرشی.
مشخصات نشر	: رشت: دانشگاه گیلان، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	: III، ۵۳۰ص: مصورا (بخشی رنگی).
شابک	: 978-600-153-182-8
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: برق -- سیستم‌ها
موضوع	: Electric power systems
موضوع	: برق -- سیستم‌ها -- طرح و ساختمان -- دادپردازی
موضوع	: Electric power systems -- Design and construction -- Data processing
موضوع	: برق نیرو -- انتقال
موضوع	: Electric power transmission
موضوع	: برق -- خطوط
موضوع	: Electric lines
موضوع	: الکترونیک نیرو
موضوع	: Power electronics
شناسه افزوده	: دانشگاه گیلان
رده بندی کنگره	: TK۱۰۰/۹م ۱۳۹۷
رده بندی دیسی	: ۶۲۱/۳۱
شماره کتابخانه	: ۵۲۳۳۶۴۸

اداره چاپ و انتشارات دانشگاه گیلان

نام کتاب	: سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند
مؤلفان	: سید مسعود مقدس تفرشی
ویراستار علمی	: دکتر حسین افراخته
ویراستار ادبی	: فرشته گلچین راد
نوبت چاپ	: اول، ۱۳۹۸
ناشر	: انتشارات دانشگاه گیلان
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۶۵۰۰۰۰ ریال

* هر گونه چاپ و تکثیر فقط در اختیار انتشارات دانشگاه گیلان است.*

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

پیشگفتار مؤلف

در سالیان اخیر باتوجه به حضور عناصر جدید از جمله واحدهای پراکنده تولیدی و ذخیره‌سازها در سیستم‌های انرژی الکتریکی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحدهای تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، خطرات احتمالی ناشی از تولید برق در واحدهای نیروگاهی مبتنی بر شکافت هسته‌ای، مستهلک‌بودن زیرساخت‌های موجود انرژی، بازدهی پایین سیستم‌های انرژی الکتریکی متمرکز سنتی، امنیت پایین سیستم‌های کنترل متمرکز، بالابودن نرخ شدت انرژی و ...، متخصصین و نظریه‌پردازان سیستم‌های انرژی الکتریکی را بر آن داشته‌است تا با تکیه بر فن‌آوری‌های نوین تولید و ذخیره‌سازی انرژی، فن‌آوری‌های پیشرفته ارتباطات و اطلاعات، اینترنت اشیا، رایانش ابری و غیره راهکارهایی برای ایجاد یک سیستم انرژی الکتریکی پایدار ارائه نمایند.

از مهم‌ترین شاخص‌های یک سیستم انرژی الکتریکی پایدار می‌توان به هوشمندبودن، نبود تمرکز و شبکه‌ای بودن زیرساخت انرژی و سیستم کنترل آن، تاب‌آوری در مقابل تمامی مخاطرات ممکن و همچنین یکپارچگی انواع حامل‌های انرژی در سامانه آن، اشاره نمود.

آشنایی با اجزای یک سیستم انرژی الکتریکی پایدار، تمامی سطوح آن اعم از سطح زیرساخت انرژی و سطح زیرساخت هدایت و راهبری شبکه برای تمامی کسانی که به مقوله توسعه پایدار در سیستم‌های انرژی علاقه‌مند هستند و به‌خصوص دانشجویان دو مقطع تحصیلات تکمیلی رشته‌های برق، برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی، سیستم‌های انرژی و سایر رشته‌های تحصیلی مرتبط و نیز سیاست‌گذاران امور انرژی کشور بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این کتاب گسترش شده‌است، در هشت فصل به بررسی اجمالی این مباحث پرداخته‌شود.

در فصل اول این کتاب سعی می‌شود، چشم‌انداز توسعه سیستم‌های انرژی الکتریکی در مسیر تکامل خود به سمت یک سیستم انرژی هوشمند ترسیم شود.

فصل دوم به‌طور مشروح به بررسی زیرساخت انرژی در مسیر تغییرات تکاملی آن می‌پردازد.

در فصل سوم کتاب به مباحث مرتبط با زیرساخت هدایت و راهبری هوشمند در سیستم‌های انرژی الکتریکی پرداخته می‌شود و چشم‌انداز آینده ساختار چنین سیستمی در قالب یک سیستم انرژی الکتریکی پایدار بیان می‌گردد.

فصل چهارم کتاب تحت‌عنوان بازار هوشمند، به تبیین انواع طراحی‌های محتمل برای یکپارچه‌سازی عناصر جدید در تعاملات بازاری سیستم‌های انرژی الکتریکی پایدار می‌پردازد.

در فصل پنجم کتاب واحدهای تولید برق مورد بررسی قرار می‌گیرند و مشخصه‌های عملکردی این واحدها برای حضور در سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند مورد بحث واقع می‌شوند.

فصل ششم کتاب به بررسی انواع ذخیره‌سازهای مطرح برای استفاده در ساختار سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند می‌پردازد و آن‌ها را با توجه به انواع شاخص‌های عملکردی دسته‌بندی می‌نماید.

فصل هفتم کتاب به بحث مدیریت سمت تقاضای انرژی می‌پردازد و انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و نقش آن‌ها در یک سیستم انرژی الکتریکی هوشمند را بررسی می‌کند.

فصل هشتم به تشریح انواع خودرشدی که قابلیت اتصال به شبکه انرژی الکتریکی را دارا می‌باشند، می‌پردازد و نقش آن‌ها را در تسهیل یکپارچه‌سازی شبکه‌های حمل و نقل در سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند تشریح می‌نماید.

تألیف این کتاب با توجه به حجم و تنوع مطالب آن به هیچ تردیدی خالی از نقص نمی‌باشد، لذا بسیار مزید امتنان خواهد بود، اگر دانش‌پژوهان، دانش‌جویان، صاحب‌نظران مسائل انرژی و کلیه خوانندگان این مجموعه، اینجانب را از نقطه‌نظرات و پیشنهادهای ارزشمند خود آگاه فرمایند، تا در چاپ‌های بعدی مد نظر قرار گیرند.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از کلیه همکاران خود در گروه برق دانشگاه سیلان به‌ویژه آقای دکتر حسین افراخته که ویراستاری علمی این کتاب را تقبل فرمودند و همچنین داوران محترم، که با توصیه‌ها و انتقادات سازنده خود اینجانب را در امر تدوین این مجموعه یاری رساندند، تشکر نمایم.

تشکر اینجانب هم‌چنین شامل اعضای محترم کمیته نشر دانشگاه گیلان، که در انتشار این کتاب از هیچ کوششی دریغ ننمودند، جناب آقای مهندس میلاد مهری بابت مرور مطالب و هم‌فکری در تهیه طرح جلد کتاب، ویراستار محترم ادبی این مجموعه و نیز سایر کسانی که به‌نحوی اینجانب را در امر تألیف این کتاب یاری رساندند، می‌گردد.

این کتاب به کلیه کسانی که به آینده کشور عزیزمان ایران می‌اندیشند و توسعه پایدار کشور را سرلوحه اهداف خود قرار داده‌اند، تقدیم می‌شود.

زمستان ۱۳۹۷

سید مسعود مقدس تفرشی

دانشیار گروه برق دانشگاه گیلان

tafreshi@guilan.ac.ir

tafreshi@eetd.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

فهرست عناوین

فصل اول: سیستم‌های انرژی الکتریکی در مسیر تغییر و تکامل.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تغییر رویکرد در برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های انرژی الکتریکی.....	۴
۳-۱ ارزیابی سیستم‌های انرژی الکتریکی.....	۸
۱-۳-۱ باردهی فنی.....	۱۰
۲-۳-۱ باردهی اقتصادی.....	۱۱
۳-۳-۱ منابع انرژی.....	۱۲
۴-۳-۱ فناوری تولید.....	۱۵
۵-۳-۱ نوع سیستم.....	۱۶
۶-۳-۱ قابلیت اطمینان سیستم.....	۱۷
۷-۳-۱ امنیت سیستم.....	۱۸
۸-۳-۱ سازگاری زیست‌محیطی.....	۱۸
۴-۱ مسیر توسعه به سمت سیستم‌های انرژی الکتریکی.....	۲۰
۵-۱ راهبرد پیاده‌سازی سیستم‌های انرژی الکتریکی هوشمند.....	۲۶
۶-۱ جمع‌بندی.....	۲۹
مراجع فصل ۱:.....	۲۹

فصل دوم: زیرساخت انرژی هوشمند.....	۳۱
۱-۲ مقدمه.....	۳۲
۲-۲ زیرساخت انرژی متمرکز (سنتی).....	۳۳
۱-۲-۲ ویژگی‌های زیرساخت انرژی متمرکز.....	۳۴
۲-۲-۲ ضرورت گذار از ساختار متمرکز سیستم انرژی الکتریکی.....	۳۷
۳-۲ زیرساخت انرژی متمرکز-پراکنده با ضریب نفوذ پایین واحدهای تولیدپراکنده.....	۳۸
۴-۲ زیرساخت انرژی متمرکز-پراکنده با ضریب نفوذ بالای منابع پراکنده انرژی.....	۴۱
۱-۴-۲ شبکه هوشمند انرژی الکتریکی.....	۴۴
۲-۴-۲ ویژگی‌های سیستم انرژی الکتریکی در این مرحله از تکامل زیرساخت انرژی.....	۴۶
۵-۲ توسعه سیستم‌های انرژی محلی هوشمند خودمختار تک حامل انرژی.....	۴۸
۱-۵-۲ زیرساخت انرژی شبکه توزیع فعال.....	۵۱
۲-۵-۲ زیرساخت انرژی ریزشبکه هوشمند.....	۵۳
۳-۵-۲ خله هوشمند.....	۶۰
۴-۵-۲ نیروگاه تولید مجاز.....	۶۳
۶-۲ سیستم‌های انرژی - محلی.....	۶۶
۷-۲ جمع‌بندی.....	۷۲
مراجع فصل ۲.....	۷۲
فصل سوم: زیرساخت هدایت و راهبری هوشمند.....	۷۵
۱-۳ مقدمه.....	۷۶
۲-۳ تغییر و تکامل در سیستم‌های دیسپاچینگ.....	۷۸
۳-۳ زیرساخت سیستم دیسپاچینگ.....	۸۴

۱-۳-۳	سیستم اسکادا	۸۵
۲-۳-۳	معماری سیستم دیسپاچینگ	۱۰۰
۳-۳-۳	سیستم پایش فراگیر (WAMS)	۱۰۳
۴-۳-۳	اتوماسیون در شبکه توزیع غیرفعال	۱۰۶
۴-۳	شبکه توزیع هوشمند	۱۱۲
۱-۴-۳	زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته ()	۱۱۵
۲-۴-۳	یکپارچه‌سازها در شبکه توزیع هوشمند	۱۱۸
۳-۴-۳	اتوماسیون شبکه توزیع	۱۴۸
۵-۳	جمع‌بندی	۱۵۸
۳	مراجع فصل ۳	۱۵۸
فصل چهارم	بازار هوشمند برق	۱۶۳
۱-۴	مقدمه	۱۶۴
۲-۴	بازار برق در ساختار متداول سیستم قدرت	۱۶۷
۱-۲-۴	مراحل تجدیدساخت بازار	۱۶۹
۲-۲-۴	مدل‌های بازار برق	۱۷۲
۳-۲-۴	عناصر بازار برق متداول	۱۷۹
۴-۲-۴	انواع بازارهای برق	۱۸۷
۳-۴	بازار هوشمند	۱۹۲
۱-۳-۴	لزوم تحول در بازارهای برق متداول	۱۹۲
۲-۳-۴	ویژگی‌های بازار هوشمند	۱۹۴
۳-۳-۴	مدل‌های پیشنهادی بازار هوشمند	۱۹۷
۴-۴	جمع‌بندی	۲۱۶
۴	مراجع فصل ۴	۲۱۶

فصل پنجم: تولید هوشمند انرژی الکتریکی..... ۲۱۹

۱-۵ مقدمه..... ۲۲۰

۲-۵ مقایسه ویژگی‌های انواع واحدهای تولید برق..... ۲۲۳

۱-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر جایگاه در شبکه..... ۲۲۳

۲-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر قابلیت هدایت و راهبری..... ۲۳۰

۳-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر پوشش بار..... ۲۳۳

۴-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر سازگاری زیست‌محیطی..... ۲۳۳

۵-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر قابلیت تولید هم‌زمان..... ۲۳۵

۶-۲-۵ مقایسه از نقطه‌نظر اقتصادی..... ۲۴۱

۳-۵ انواع متداول نیروگاه‌های تولید برق سنتی..... ۲۴۸

۱-۳-۵ نیروگاه بخار..... ۲۴۸

۲-۳-۵ نیروگاه‌های توربین‌گازی..... ۲۶۲

۳-۳-۵ نیروگاه‌های سیکل ترکیبی..... ۲۶۶

۴-۳-۵ نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای..... ۲۷۱

۵-۳-۵ نیروگاه آبی..... ۲۹۰

۴-۵ نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی نو..... ۳۱۰

۱-۴-۵ سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشید..... ۳۱۰

۲-۴-۵ سیستم‌های انرژی مبتنی بر انرژی بادی..... ۳۵۳

۳-۴-۵ سیستم‌های انرژی مبتنی بر هسته..... ۳۷۵

۴-۴-۵ سیستم‌های مبتنی بر پیل سوختی..... ۳۹۰

۵-۴-۵ سیستم‌های مبتنی بر انرژی دریایی..... ۴۱۰

۶-۴-۵ سیستم‌های انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی..... ۴۲۱

۷-۴-۵ میکروتوربین..... ۴۳۲

۸-۴-۵ نیروگاه‌های مبتنی بر گداخت هسته‌ای..... ۴۳۶

۵-۵ جمع‌بندی..... ۴۴۴

مراجع فصل ۵:..... ۴۴۴

فصل ششم: ذخیره‌سازی هوشمند انرژی.....	۴۴۷
۱-۶ مقدمه.....	۴۴۸
۲-۶ ذخیره‌سازی انرژی و نقش آن در یکپارچه‌سازی شبکه‌های مختلف انرژی.....	۴۴۹
۳-۶ شاخص‌های انتخاب ذخیره‌ساز الکتریکی.....	۴۵۱
۴-۶ نقش ذخیره‌سازهای الکتریکی در سیستم قدرت.....	۴۶۲
۱-۴-۶ مدیریت بار الکتریکی.....	۴۶۲
۲-۴-۶ قابل راهبری نمودن واحدهای غیر قابل‌راهبری.....	۴۶۴
۳-۴-۶ سوداگری در بازار برق.....	۴۶۵
۴-۴-۶ فراهم‌سازی امکان بهره‌برداری بهینه واحدهای تولید هم‌زمان.....	۴۶۶
۵-۶ انواع ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی.....	۴۶۶
۱-۵-۶ پمپ‌ذخیره‌ای.....	۴۶۸
۲-۵-۶ واحدهای هواذخیره‌ای (CAES).....	۴۸۰
۳-۵-۶ واحد ذخیره‌سازی هیدروژن.....	۴۸۵
۴-۵-۶ ابرخازن.....	۵۰۱
۵-۵-۶ ذخیره‌سازی شیمیایی.....	۵۱۱
۶-۵-۶ ذخیره‌سازی چرخ سردان (لیار).....	۵۱۵
۶-۶ ذخیره‌ساز حرارتی.....	۵۱۹
۱-۶-۶ ذخیره‌سازهای انرژی گرمایشی.....	۵۱۹
۲-۶-۶ ذخیره‌سازهای انرژی سرمایشی.....	۵۲۵
۷-۶ جمع‌بندی.....	۵۲۷
مراجع فصل ۶:.....	۵۲۷
فصل هفتم: مصرف هوشمند انرژی.....	۵۲۹
۱-۷ مقدمه.....	۵۳۰

۲-۷ مدیریت انرژی در سیستم‌های انرژی هوشمند.....	۵۳۲
۱-۲-۷ راهکارهای مدیریت سمت تقاضای انرژی.....	۵۳۳
۲-۲-۷ جایگاه بارهای پاسخ‌گو در مدیریت تقاضای انرژی.....	۵۳۶
۳-۷ برنامه‌های پاسخ‌گویی بار.....	۵۳۸
۱-۳-۷ برنامه‌های تشویق‌محور.....	۵۳۹
۲-۳-۷ برنامه‌های زمان‌محور مبتنی بر تعرفه.....	۵۴۷
۴-۷ نقش برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در عملیات شبکه.....	۵۵۲
۱-۴-۷ نقش پاسخ‌گویی بار در مدیریت پیشامدهای تأثیرگذار بر بهره‌برداری شبکه.....	۵۵۳
۵-۷ منافع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار.....	۵۵۷
۶-۷ هزینه‌های پاسخ‌گویی بار.....	۵۵۹
۷-۷ جمع‌بندی.....	۵۶۰
مراجع فصل.....	۵۶۰
فصل هشتم: خودروهای قابل اتصال به سیستم انرژی الکتریکی.....	۵۶۳
۱-۸ مقدمه.....	۵۶۴
۲-۸ خودروهای ترکیبی الکتریکی قابل اتصال به شبکه.....	۵۶۸
۱-۲-۸ تاریخچه فن‌آوری خودروی الکتریکی.....	۵۶۸
۲-۲-۸ ویژگی‌های خودروهای ترکیبی الکتریکی قابل اتصال به شبکه.....	۵۷۱
۳-۲-۸ منافع و چالش‌های حضور PHEV در سیستم‌های انرژی.....	۵۷۴
۴-۲-۸ یکپارچه‌سازی خودروهای PHEV در سیستم انرژی.....	۵۷۶
۵-۲-۸ برنامه‌های شارژ/دشارژ خودروهای ترکیبی الکتریکی قابل اتصال به شبکه.....	۵۸۲
۶-۲-۸ تعاملات بازاری خودروهای ترکیبی الکتریکی قابل اتصال به شبکه.....	۵۸۵
۷-۲-۸ محاسبه انرژی ذخیره در باتری خودروهای ترکیبی الکتریکی قابل اتصال به شبکه.....	۵۸۶

۵۸۸	۳-۸ خودروهای مبتنی بر سوخت هیدروژن.....
۵۸۹	۱-۳-۸ خودروهای هیدروژن-سوز.....
۵۹۱	۲-۳-۸ خودروهای مبتنی بر هیدروژن-پیل سوختی.....
۵۹۳	۴-۸ جمع‌بندی.....
۵۹۴	مراجع فصل ۸:.....