



KNO-1201-4702

تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های برق هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین: چالش‌ها و راهکارهای نوین

علیرضا جوشن

کارشناسی ارشد برق قدرت گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

Alireza.joshan.guilan@gmail.com

چکیده

شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک راهکار نوین برای مدیریت و توزیع انرژی در عصر دیجیتال، به طور فزاینده‌ای در حال توسعه و گسترش هستند. این مقاله مروری به تحلیل و بررسی عملکرد شبکه‌های برق هوشمند و نقش الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بهینه‌سازی این عملکرد می‌پردازد. در ابتدا، ساختار و اجزای اصلی شبکه‌های برق هوشمند، از جمله حسگرها، سیستم‌های کنترل و ارتباطات، معرفی می‌شود. سپس، چالش‌های کلیدی موجود در این شبکه‌ها، از جمله مدیریت بار، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و حفظ امنیت سایبری، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مقاله به بررسی انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از جمله یادگیری نظارت‌شده و بدون نظارت، و کاربردهای آن‌ها در پیش‌بینی بار، مدیریت تقاضا و تشخیص ناهنجاری‌ها می‌پردازد. نتایج تجربی از پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها در شبکه‌های برق هوشمند نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کارایی و کاهش هزینه‌ها است. در نهایت، این مقاله به چالش‌های موجود در پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند، از جمله نیاز به داده‌های با کیفیت، مسائل مربوط به حریم خصوصی و امنیت، و نیاز به زیرساخت‌های مناسب، می‌پردازد. همچنین، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده و راهکارهای نوین برای بهبود عملکرد شبکه‌های برق هوشمند ارائه می‌شود. این مقاله به عنوان یک منبع جامع برای پژوهشگران و متخصصان در زمینه انرژی و فناوری اطلاعات، به بررسی روندهای جاری و آینده در این حوزه می‌پردازد و به اهمیت همکاری بین بخش‌های مختلف صنعت و دانشگاه‌ها در توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های برق هوشمند تأکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های برق هوشمند، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی عملکرد، پیش‌بینی بار، امنیت سایبری



۱- مقدمه

در دنیای امروز، با افزایش جمعیت و رشد سریع فناوری، تقاضا برای انرژی به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱]. این افزایش تقاضا، چالش‌های متعددی را برای سیستم‌های انرژی سنتی به وجود آورده است و نیاز به راهکارهای نوین و کارآمد را بیش از پیش نمایان کرده است [۲ و ۳]. در این راستا، شبکه‌های برق هوشمند (Smart Grids) به عنوان یک راهکار پیشرفته برای مدیریت و توزیع انرژی در سطح جهانی مطرح شده‌اند. این شبکه‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات، امکان نظارت و کنترل بهینه مصرف انرژی را فراهم می‌آورند و به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند [۴ و ۵].

پیشینه تحقیق در این حوزه نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های بزرگ و پیچیده در شبکه‌های برق هوشمند، به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۶-۸]. این الگوریتم‌ها به ویژه در زمینه‌های پیش‌بینی بار، مدیریت تقاضا، تشخیص ناهنجاری‌ها و بهینه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر به کار گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) می‌تواند دقت پیش‌بینی بار را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و به بهبود عملکرد کلی شبکه‌های برق کمک کند [۹-۱۱].

با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه، هنوز شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد. یکی از این شکاف‌ها، عدم وجود یک چارچوب جامع برای ادغام الگوریتم‌های یادگیری ماشین با زیرساخت‌های موجود در شبکه‌های برق هوشمند است [۱۲-۱۶]. همچنین، چالش‌های مربوط به کیفیت داده‌ها، حریم خصوصی و امنیت سایبری نیز به عنوان موانع اصلی در پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها شناخته می‌شوند. به علاوه، بسیاری از تحقیقات موجود به بررسی الگوریتم‌های خاص پرداخته‌اند و کمتر به تحلیل مقایسه‌ای و جامع از روش‌های مختلف پرداخته شده است [۱۷ و ۱۸].

نوآوری این مقاله در ارائه یک تحلیل جامع از چالش‌ها و فرصت‌های موجود در استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند است. این مقاله به بررسی روندهای جاری و آینده در این حوزه می‌پردازد و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده و راهکارهای نوین برای بهبود عملکرد شبکه‌های برق هوشمند ارائه می‌دهد. با توجه به اهمیت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز به مدیریت بهینه منابع انرژی، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک منبع ارزشمند برای پژوهشگران و متخصصان در این حوزه عمل کند.

۲- شبکه‌های برق هوشمند

شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک تحول اساسی در صنعت انرژی شناخته می‌شوند که هدف آن‌ها بهبود کارایی، قابلیت اطمینان و پایداری سیستم‌های توزیع برق است. این شبکه‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، مانند حسگرها، سیستم‌های ارتباطی و الگوریتم‌های تحلیلی، قادر به جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی از مصرف انرژی و تولید آن هستند. یکی از ویژگی‌های کلیدی شبکه‌های برق هوشمند، توانایی آن‌ها در مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف انرژی است. این شبکه‌ها همچنین به کاربران این امکان را می‌دهند که به صورت فعال در مدیریت مصرف خود مشارکت کنند و از منابع تجدیدپذیر بهره‌برداری کنند. با افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. به علاوه، این شبکه‌ها به بهبود پاسخگویی به بحران‌ها و حوادث طبیعی کمک می‌کنند و از این طریق امنیت انرژی را افزایش می‌دهند. در نهایت، شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک راه‌حل پایدار برای چالش‌های انرژی آینده مطرح می‌شوند و می‌توانند به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کنند [۱۹].

۲-۱- تعریف و ویژگی‌ها

شبکه‌های برق هوشمند به سیستم‌های توزیع و انتقال برق اطلاق می‌شود که با استفاده از فناوری‌های دیجیتال و ارتباطی، قابلیت جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها را دارند. این شبکه‌ها به کاربران و شرکت‌های برق این امکان را می‌دهند که به صورت بهینه‌تری انرژی را مدیریت کنند. از ویژگی‌های



کلیدی این شبکه‌ها می‌توان به قابلیت نظارت و کنترل در زمان واقعی، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و بهبود پاسخگویی به تقاضا اشاره کرد. همچنین، شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به شناسایی و حل مشکلات در سیستم توزیع برق به صورت خودکار کمک کنند [۲۰].

۲-۲- اهمیت و مزایای شبکه‌های برق هوشمند

شبکه‌های برق هوشمند به دلیل مزایای فراوانی که دارند، اهمیت زیادی در صنعت انرژی پیدا کرده‌اند. یکی از مزایای اصلی آن‌ها افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی است. این شبکه‌ها با بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تلفات در سیستم، به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند. همچنین، با افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. از دیگر مزایای این شبکه‌ها می‌توان به بهبود کیفیت خدمات، افزایش قابلیت اطمینان و امنیت انرژی و توانایی پاسخگویی به بحران‌ها اشاره کرد. در نهایت، شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک راه‌حل پایدار برای چالش‌های انرژی آینده مطرح می‌شوند و می‌توانند به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کنند [۲۱].

۳- الگوریتم‌های یادگیری ماشین

الگوریتم‌های یادگیری ماشین به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های برق هوشمند شناخته می‌شوند. این الگوریتم‌ها قادر به شناسایی الگوها و روندهای موجود در داده‌های بزرگ هستند و می‌توانند به پیش‌بینی تقاضای انرژی و مدیریت منابع کمک کنند. انواع مختلفی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از جمله یادگیری نظارت‌شده، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی، در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از کاربردهای مهم یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند، پیش‌بینی بار مصرفی است که به شرکت‌های برق کمک می‌کند تا منابع خود را بهینه‌تر مدیریت کنند. همچنین، این الگوریتم‌ها می‌توانند در شناسایی و تشخیص ناهنجاری‌ها در سیستم‌های توزیع برق به کار گرفته شوند، که به افزایش قابلیت اطمینان و کاهش خرابی‌ها کمک می‌کند.

علاوه بر این، یادگیری ماشین می‌تواند در بهینه‌سازی عملکرد منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و بادی، نقش مهمی ایفا کند. با استفاده از این الگوریتم‌ها، می‌توان به بهبود پیش‌بینی تولید انرژی از این منابع و مدیریت بهتر آن‌ها پرداخت. در نهایت، یادگیری ماشین به عنوان یک ابزار قدرتمند در تحول دیجیتال صنعت انرژی، به بهبود کارایی و پایداری شبکه‌های برق هوشمند کمک می‌کند [۲۲].

۳-۱- تعریف و انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین

یادگیری ماشین به مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها و تکنیک‌ها اطلاق می‌شود که به سیستم‌ها این امکان را می‌دهد تا از داده‌ها یاد بگیرند و بدون برنامه‌نویسی صریح، پیش‌بینی‌ها یا تصمیم‌گیری‌هایی انجام دهند. این الگوریتم‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: یادگیری نظارت‌شده، که در آن مدل‌ها با استفاده از داده‌های برچسب‌گذاری شده آموزش می‌بینند، و یادگیری بدون نظارت، که در آن مدل‌ها به شناسایی الگوها و ساختارهای موجود در داده‌های بدون برچسب می‌پردازند [۲۳].



۳-۲- کاربردهای یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند

یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند کاربردهای متعددی دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردها، پیش‌بینی بار مصرفی است که به شرکت‌های برق کمک می‌کند تا منابع خود را بهینه‌تر مدیریت کنند. همچنین، این الگوریتم‌ها می‌توانند در شناسایی ناهنجاری‌ها و مشکلات در سیستم‌های توزیع برق به کار گرفته شوند، که به افزایش قابلیت اطمینان و کاهش خرابی‌ها کمک می‌کند [۲۴].

۳-۳- مزایای استفاده از یادگیری ماشین

استفاده از یادگیری ماشین در شبکه‌های برق هوشمند مزایای زیادی دارد. این الگوریتم‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی عملکرد منابع انرژی تجدیدپذیر کمک کنند و پیش‌بینی تولید انرژی از این منابع را بهبود بخشند. همچنین، با تحلیل داده‌های بزرگ، یادگیری ماشین می‌تواند به شناسایی روندها و الگوهای مصرف انرژی کمک کند و به شرکت‌ها این امکان را بدهد که تصمیمات بهتری در زمینه مدیریت انرژی اتخاذ کنند. در نهایت، یادگیری ماشین به عنوان یک ابزار نوآورانه، به تحول دیجیتال در صنعت انرژی و بهبود کارایی شبکه‌های برق هوشمند کمک می‌کند [۲۵].

۴- چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی شبکه‌های برق هوشمند

پیاده‌سازی شبکه‌های برق هوشمند با چالش‌ها و موانع متعددی روبرو است که می‌تواند بر موفقیت این پروژه‌ها تأثیر بگذارد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه است. نصب و راه‌اندازی زیرساخت‌های جدید، از جمله حسگرها، نرم‌افزارها و سیستم‌های ارتباطی، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است که ممکن است برای برخی از شرکت‌ها دشوار باشد.

چالش دیگر، مسائل مربوط به امنیت سایبری است. با افزایش استفاده از فناوری‌های دیجیتال، خطر حملات سایبری نیز افزایش می‌یابد. این تهدیدات می‌توانند به شبکه‌های برق آسیب برسانند و قابلیت اطمینان آن‌ها را کاهش دهند. بنابراین، نیاز به توسعه راهکارهای امنیتی قوی و مؤثر برای حفاظت از این شبکه‌ها وجود دارد.

علاوه بر این، عدم هماهنگی و همکاری بین نهادهای مختلف، از جمله شرکت‌های برق، دولت‌ها و مصرف‌کنندگان، می‌تواند مانع از پیاده‌سازی موفق شبکه‌های برق هوشمند شود. همچنین، نیاز به آموزش و آگاهی‌بخشی به مصرف‌کنندگان درباره مزایای این شبکه‌ها و نحوه استفاده از آن‌ها نیز از دیگر چالش‌هاست. در نهایت، مسائل مربوط به استانداردسازی و یکپارچگی فناوری‌ها نیز می‌تواند بر روند پیاده‌سازی تأثیرگذار باشد و نیاز به همکاری بین‌المللی را افزایش دهد [۲۶].

۴-۱- هزینه‌های سرمایه‌گذاری

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در پیاده‌سازی شبکه‌های برق هوشمند، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه است. نصب و راه‌اندازی زیرساخت‌های جدید، از جمله حسگرها، نرم‌افزارها و سیستم‌های ارتباطی، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است. این هزینه‌ها می‌تواند برای شرکت‌های برق و دولت‌ها به عنوان یک مانع جدی عمل کند و ممکن است باعث تأخیر در اجرای پروژه‌ها شود [۲۷].

۴-۲- امنیت سایبری

مسائل مربوط به امنیت سایبری یکی دیگر از چالش‌های مهم در شبکه‌های برق هوشمند است. با افزایش استفاده از فناوری‌های دیجیتال، خطر حملات سایبری نیز افزایش می‌یابد. این تهدیدات می‌توانند به شبکه‌های برق آسیب برسانند و قابلیت اطمینان آن‌ها را کاهش دهند. بنابراین، توسعه راهکارهای امنیتی قوی و مؤثر برای حفاظت از این شبکه‌ها ضروری است [۲۸].

۴-۳- عدم هماهنگی بین نهادها



عدم هماهنگی و همکاری بین نهادهای مختلف، از جمله شرکت‌های برق، دولت‌ها و مصرف‌کنندگان، می‌تواند مانع از پیاده‌سازی موفق شبکه‌های برق هوشمند شود. این عدم هماهنگی می‌تواند به ایجاد مشکلاتی در تبادل اطلاعات و تصمیم‌گیری‌های مشترک منجر شود و روند پیشرفت پروژه‌ها را کند کند [۲۹].

۴-۴- آگاهی و آموزش مصرف‌کنندگان

آموزش و آگاهی‌بخشی به مصرف‌کنندگان درباره مزایای شبکه‌های برق هوشمند و نحوه استفاده از آن‌ها نیز از دیگر چالش‌هاست. بسیاری از مصرف‌کنندگان ممکن است از فناوری‌های جدید و مزایای آن‌ها آگاهی نداشته باشند، که این موضوع می‌تواند مانع از پذیرش و استفاده مؤثر از این شبکه‌ها شود [۳۰].

۴-۵- استانداردسازی و یکپارچگی فناوری‌ها

مسائل مربوط به استانداردسازی و یکپارچگی فناوری‌ها نیز می‌تواند بر روند پیاده‌سازی تأثیرگذار باشد. عدم وجود استانداردهای مشترک می‌تواند به ایجاد مشکلاتی در ارتباط بین سیستم‌ها و دستگاه‌های مختلف منجر شود. بنابراین، نیاز به همکاری بین‌المللی و توسعه استانداردهای مشترک برای تسهیل پیاده‌سازی شبکه‌های برق هوشمند احساس می‌شود [۳۱].

۵- آینده شبکه‌های برق هوشمند

آینده شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یکی از ارکان کلیدی در تحول صنعت انرژی به شمار می‌آید. با پیشرفت فناوری‌های نوین، انتظار می‌رود که این شبکه‌ها به طور فزاینده‌ای هوشمندتر و کارآمدتر شوند. یکی از روندهای مهم، افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که به شبکه‌های برق هوشمند این امکان را می‌دهد تا به طور بهینه‌تری منابع انرژی را مدیریت کنند و به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کنند.

همچنین، با توسعه اینترنت اشیاء (IoT)، ارتباطات بین دستگاه‌ها و حسگرها بهبود خواهد یافت و این امر به جمع‌آوری و تحلیل داده‌های دقیق‌تر منجر می‌شود. این داده‌ها می‌توانند به پیش‌بینی بهتر بار مصرفی و بهینه‌سازی توزیع انرژی کمک کنند.

علاوه بر این، انتظار می‌رود که فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نقش مهمی در تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری‌های هوشمند ایفا کنند. این فناوری‌ها می‌توانند به شناسایی الگوها و روندهای مصرف انرژی کمک کنند و به شرکت‌های برق این امکان را بدهند که خدمات بهتری به مشتریان ارائه دهند.

در نهایت، با افزایش آگاهی عمومی درباره تغییرات اقلیمی و اهمیت مدیریت پایدار انرژی، تقاضا برای شبکه‌های برق هوشمند نیز افزایش خواهد یافت. این تحولات می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها منجر شود و در نهایت به یک سیستم انرژی پایدارتر و کارآمدتر کمک کند [۳۲].

۵-۱- افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

آینده شبکه‌های برق هوشمند به طور فزاینده‌ای به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر متمایل است. با توجه به تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به بهینه‌سازی ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی کمک کنند. این امر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش پایداری انرژی منجر خواهد شد [۳۳].

۵-۲- توسعه اینترنت اشیاء (IoT)



توسعه اینترنت اشیا (IoT) به شبکه‌های برق هوشمند این امکان را می‌دهد که ارتباطات بین دستگاه‌ها و حسگرها بهبود یابد. این فناوری می‌تواند به جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و تحلیل آن‌ها کمک کند، که در نتیجه به پیش‌بینی بهتر بار مصرفی و بهینه‌سازی توزیع انرژی منجر می‌شود [۳۴].

۵-۳- نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در آینده شبکه‌های برق هوشمند نقش مهمی ایفا خواهند کرد. این فناوری‌ها می‌توانند به شناسایی الگوها و روندهای مصرف انرژی کمک کنند و به شرکت‌های برق این امکان را بدهند که تصمیمات بهتری در زمینه مدیریت بار و توزیع انرژی اتخاذ کنند [۳۵].

۵-۴- بهبود کیفیت خدمات

با پیشرفت فناوری و افزایش داده‌های جمع‌آوری شده، انتظار می‌رود که کیفیت خدمات ارائه شده به مصرف‌کنندگان بهبود یابد. شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به ارائه خدمات شخصی‌سازی شده و پاسخگو به نیازهای مشتریان کمک کنند و در نتیجه رضایت آن‌ها را افزایش دهند [۳۶].

۵-۵- افزایش آگاهی عمومی

با افزایش آگاهی عمومی درباره تغییرات اقلیمی و اهمیت مدیریت پایدار انرژی، تقاضا برای شبکه‌های برق هوشمند نیز افزایش خواهد یافت. این آگاهی می‌تواند به پذیرش بیشتر فناوری‌های جدید و همکاری مصرف‌کنندگان در مدیریت مصرف انرژی منجر شود و به ایجاد یک سیستم انرژی پایدارتر کمک کند [۳۷].

۶- نتیجه‌گیری

در نهایت، شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک راهکار کلیدی برای مقابله با چالش‌های انرژی در قرن ۲۱ شناخته می‌شوند. این شبکه‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین، امکان مدیریت بهینه منابع انرژی، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورند. با توجه به روند رو به رشد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه‌های برق هوشمند می‌توانند به تسهیل ادغام این منابع کمک کنند و به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی منجر شوند.

علاوه بر این، با پیشرفت فناوری‌های ارتباطی و داده‌کاوی، انتظار می‌رود که شبکه‌های برق هوشمند به طور فزاینده‌ای هوشمندتر و پاسخگوتر شوند. این تحولات می‌توانند به بهبود کیفیت خدمات و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان منجر شوند.

با این حال، برای دستیابی به این اهداف، نیاز به همکاری بین‌المللی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و توسعه استانداردهای مشترک احساس می‌شود. همچنین، آموزش و آگاهی‌بخشی به مصرف‌کنندگان درباره مزایای این شبکه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در نهایت، آینده شبکه‌های برق هوشمند به عنوان یک عنصر کلیدی در ایجاد یک سیستم انرژی پایدار و کارآمد، نویدبخش است و می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و حفاظت از محیط زیست کمک کند.



مراجع

- [1] AHMAD, Tanveer, et al. Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160: 112128.
- [2] HOSSAIN, Eklas, et al. Application of big data and machine learning in smart grid, and associated security concerns: A review. *Ieee Access*, 2019, 7: 13960-13988.
- [3] TYAGI, Amit Kumar; TIWARI, Shrikant. 3 Machine Learning, Deep Learning, and Internet of Things–Based Smart Grids and Power Systems. *AI and Blockchain in Smart Grids: Fundamentals, Methods, and Applications*, 2025, 50.
- [4] REYES-ACOSTA, Ricardo, et al. Analysis of machine learning-based approaches for securing the Internet of Things in the smart industry: a multivocal state of knowledge review. *International Journal of Information Security*, 2025, 24.1: 31.
- [5] BASHIR, Ali Kashif, et al. Comparative analysis of machine learning algorithms for prediction of smart grid stability. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31.9: e12706.
- [6] BERGHOUT, Tarek; BENBOUZID, Mohamed; MUYEEN, S. M. Machine learning for cybersecurity in smart grids: A comprehensive review-based study on methods, solutions, and prospects. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2022, 38: 100547.
- [7] MIRAFTABZADEH, Seyed Mahdi, et al. Advances in the application of machine learning techniques for power system analytics: A survey. *Energies*, 2021, 14.16: 4776.
- [8] ALQUTHAMI, Thamer, et al. A performance comparison of machine learning algorithms for load forecasting in smart grid. *IEEE Access*, 2022, 10: 48419-48433.
- [9] ZHANG, Dongxia; HAN, Xiaoqing; DENG, Chunyu. Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2018, 4.3: 362-370.
- [10] OZAY, Mete, et al. Machine learning methods for attack detection in the smart grid. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2015, 27.8: 1773-1786.
- [11] AHMED, Waqar, et al. Machine learning based energy management model for smart grid and renewable energy districts. *IEEE Access*, 2020, 8: 185059-185078.
- [12] SHARIFHOSSEINI, Seyed Mohammad, et al. Investigating Intelligent Forecasting and Optimization in Electrical Power Systems: A Comprehensive Review of Techniques and Applications. *Energies*, 2024, 17.21: 5385.
- [13] BAZ, Abdullah, et al. Deep fuzzy nets approach for energy efficiency optimization in smart grids. *Applied Soft Computing*, 2024, 161: 111724.
- [14] WUEST, Thorsten, et al. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 2016, 4.1: 23-45.
- [15] YAN, Jihong, et al. Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *IEEE access*, 2017, 5: 23484-23491.
- [16] WEI, Yifei, et al. User scheduling and resource allocation in HetNets with hybrid energy supply: An actor-critic reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 17.1: 680-692.
- [17] KUDELINA, Karolina, et al. Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning. *Applied Sciences*, 2021, 11.6: 2761.
- [18] WANG, Hongxing, et al. Intelligent power grid monitoring and management strategy using 3D model visual computation with deep learning. *Energy Reports*, 2022, 8: 3636-3648.
- [19] NAEEM, Hamad; ULLAH, Farhan; SRIVASTAVA, Gautam. Classification of intrusion cyber-attacks in smart power grids using deep ensemble learning with metaheuristic-based optimization. *Expert Systems*, 2025, 42.1: e13556.



- [20] POWELL, Jady, et al. Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends. *Energy Reports*, 2024, 11: 5760-5785.
- [21] PARIZAD, Ali; BAGHAEE, Hamid Reza; RAHMAN, Saifur (ed.). *Smart Cyber-Physical Power Systems, Volume 1: Fundamental Concepts, Challenges, and Solutions*. John Wiley & Sons, 2025.
- [22] NAJAFZADEH, Masoud, et al. Fault detection, classification and localization along the power grid line using optimized machine learning algorithms. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2024, 17.1: 49.
- [23] NAVEEDA, K.; FATHIMA, SMH Sithi Shameem. Real-time implementation of IoT-enabled cyberattack detection system in advanced metering infrastructure using machine learning technique. *Electrical Engineering*, 2025, 107.1: 909-928.
- [24] MOSTAFA, Noha; RAMADAN, Haitham Saad Mohamed; ELFAROUK, Omar. Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning. *Machine Learning with Applications*, 2022, 9: 100363.
- [25] AJMAL, C. S., et al. Innovative Approaches in Regulatory Affairs: Leveraging Artificial Intelligence and Machine Learning for Efficient Compliance and Decision-Making. *The AAPS Journal*, 2025, 27.1: 22.
- [26] BISWAS, Parag, et al. An Extensive and Methodical Review of Smart Grids for Sustainable Energy Management-Addressing Challenges with AI, Renewable Energy Integration and Leading-edge Technologies. *IEEE Access*, 2025.
- [27] HAQUE, Abrarul, et al. Technical and Economic Challenges and Future Prospects of a Smart Grid-A Case Study. *Control Systems and Optimization Letters*, 2023, 1.3: 186-193.
- [28] ACHAAL, Batoul, et al. Study of smart grid cyber-security, examining architectures, communication networks, cyber-attacks, countermeasure techniques, and challenges. *Cybersecurity*, 2024, 7.1: 10.
- [29] RAI, Ila; SUCHETA, C. Microgrid and grid synchronization: A critical analysis of challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 2025, 242: 111434.
- [30] MONACO, Roberto, et al. Digitalization of power distribution grids: Barrier analysis, ranking and policy recommendations. *Energy Policy*, 2024, 188: 114083.
- [31] INCI, Mustafa, et al. Power system integration of electric vehicles: A review on impacts and contributions to the smart grid. *Applied Sciences*, 2024, 14.6: 2246.
- [32] VELASQUEZ, Washington; MOREIRA-MOREIRA, Guillermo Z.; ALVAREZ-ALVARADO, Manuel S. Smart grids empowered by software-defined network: A comprehensive review of advancements and challenges. *IEEE Access*, 2024.
- [33] HASSAN, Qusay, et al. Enhancing smart grid integrated renewable distributed generation capacities: Implications for sustainable energy transformation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, 66: 103793.
- [34] NASSEREDDINE, Mohamed; KHANG, Alex. Applications of Internet of Things (IoT) in smart cities. In: *Advanced IoT technologies and applications in the industry 4.0 digital economy*. CRC Press, 2024. p. 109-136.
- [35] BALAMURUGAN, M., et al. Role of artificial intelligence in smart grid—a mini review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2025, 8: 1551661.
- [36] AKRAM, Ali, et al. Smart energy management system using machine learning. *Computers, Materials & Continua*, 2024, 78.1.
- [37] VIVEK, R.; GANESHKUMAR, S. 11 Smart Grid Technologies. *Efficient Energy Utilization and Emission Reduction Strategies in Plant Operations*, 2025, 176.