چهارمین کنفرانس بین‌المللی
دانشجویان و مهندسان
برق و انرژی‌های پاک
fourth International Conference for
Students and Engineers of
Electrical and Clean Energy

بررسی نقش هوش مصنوعی در تولید ، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی

سید سعید موسوی آنچه پلی، روژین معدنکار

هیئت علمی دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل

Anchepoli@gmail.com

دانشجو ارشد مهندسی سیستم های انرژی دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل

Rozhinmadankar@ausmt.ac.ir :

چکیده

این مقاله با رویکردی مروری، به بررسی جامع کاربردهای هوش مصنوعی در سه بخش کلیدی تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی می‌پردازد.در بخش تولید، الگوریتم‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)و روش‌های تکاملی، دقت بالایی در پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت ارائه داده‌اند که منجر به بهبود برنامه‌ریزی تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی شده‌اند. همچنین، راه‌کارهای نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین، موجب کاهش خرابی‌های ناگهانی و افزایش طول عمر تجهیزات تولیدی می‌شوند.در حوزه انتقال انرژی، استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در تشخیص، مکان‌یابی و طبقه‌بندی خطاها، قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داده و زمان واکنش به حوادث را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری ماشین در پایش وضعیت تجهیزات کلیدی همچون ترانسفورماتورها و خطوط فشار قوی، نقش مؤثری در پیشگیری از بروز اختلال ایفا می‌کنند.در بخش توزیع نیز، با گسترش شبکه‌های هوشمند و منابع انرژی تجدیدپذیر، زمینه مناسبی برای پیاده‌سازی راه‌کارهای هوشمند فراهم شده است. از جمله می‌توان به مدیریت سمت تقاضا، یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده و به‌کارگیری سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) و SCADA در کنترل لحظه‌ای شبکه اشاره کرد.در نهایت، یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند نه‌تنها عملکرد فنی و اقتصادی شبکه‌های قدرت را بهبود بخشد، بلکه در تحقق پایداری زیست‌محیطی نیز نقش کلیدی ایفا کند. با این حال، چالش‌هایی همچون امنیت داده، شفافیت مدل‌ها و پیچیدگی محاسباتی از جمله موضوعات مهمی هستند که در تحقیقات آینده باید مورد توجه قرار گیرند.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، انرژی الکتریکی، پیش‌بینی بار، تشخیص خطا، تولید برق.

مقدمه مقاله

رشد فزاینده تقاضای جهانی برای انرژی الکتریکی، همراه با پیچیدگی‌های روزافزون در ساختار و مدیریت شبکه‌های قدرت، لزوم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و هوشمند را بیش از پیش نمایان کرده است [۱], [۲]. این چالش‌ها، به‌ویژه با گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر، افزایش مصرف‌کنندگان فعال و نیاز به بهره‌وری بالا، اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند [۳], [۴]. سیستم‌های قدرت سنتی به دلیل ساختار سلسله‌مراتبی، محدودیت در انعطاف‌پذیری و ضعف در پاسخ‌دهی سریع به تغییرات، دیگر قادر به پاسخ‌گویی به نیازهای شبکه‌های مدرن نیستند [۵], [۶].

در این میان، هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی قرن بیست‌ویکم، نقش محوری در تحول دیجیتال صنعت برق ایفا می‌کند. این فناوری با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی عمیق، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سیستم‌های هوشمند، توانایی تحلیل داده‌های حجیم، مدل‌سازی رفتار سیستم‌های قدرت و اتخاذ تصمیمات بهینه را در شرایط پیچیده و متغیر فراهم می‌آورد [۷], [۸]. کاربردهای هوش مصنوعی در صنعت برق، از مرحله تولید گرفته تا انتقال و توزیع، به سرعت در حال گسترش است [۹].

در حوزه تولید انرژی، مطالعات متعددی به به‌کارگیری هوش مصنوعی در پیش‌بینی بار مصرف، بهینه‌سازی بهره‌برداری و نگهداری پیش‌بینانه از تجهیزات پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، مدل‌های یادگیری عمیق نظیر شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و LSTM، برای پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت به کار رفته‌اند و دقت بسیار بالایی در مقایسه با روش‌های سنتی از خود نشان داده‌اند [۱۰], [۱۱]. همچنین مرورهای سیستماتیک نشان می‌دهد الگوریتم‌های مبتنی بر درخت تصمیم، یادگیری تقویتی و سیستم‌های چندعاملی در بهینه‌سازی تولید و مدیریت تقاضا نتایج قابل‌توجهی به همراه داشته‌اند [۱۲], [۱۳].

در بخش انتقال انرژی، مطالعات بسیاری به کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص و طبقه‌بندی خطاها پرداخته‌اند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم‌های یادگیری نظارتی، قابلیت بالایی در شناسایی سریع و دقیق خطاهای شبکه‌های انتقال دارند [۱۴], [۱۵]. افزون بر این، تحلیل داده‌های بلادرنگ SCADA و به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای مکان‌یابی و طبقه‌بندی خودکار خطاهای پیچیده، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۷], [۱۱].

در حوزه توزیع انرژی، تمرکز تحقیقات بر توسعه شبکه‌های هوشمند و ادغام منابع تولید پراکنده (DERs) بوده است. مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، جهت بهبود پایداری ولتاژ و تعادل بار در شبکه‌های توزیع، کاربرد فراوانی یافته‌اند [۱۲], [۱۳], [۱۴]. علاوه بر این، استفاده از سیستم‌های یادگیری تقویتی و مدل‌های مبتنی بر چندعامل در مدیریت بهینه توان و مصرف در شبکه‌های توزیع هوشمند به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [۱۰], [۱۵].

مرور کلی این مطالعات نشان می‌دهد که هوش مصنوعی نه‌تنها در پژوهش‌های نظری بلکه در فاز پیاده‌سازی‌های عملی نیز به سرعت در حال پیشرفت است. با این حال، مسائلی همچون کیفیت داده‌ها، امنیت سایبری، نیاز به مدل‌های مقاوم و هزینه‌های اجرایی، همچنان به‌عنوان چالش‌های اصلی در مسیر به‌کارگیری گسترده‌تر هوش مصنوعی در صنعت برق مطرح هستند [۸], [۹], [۱۵].**کاربرد هوش مصنوعی در تولید انرژی الکتریکی**

یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین حوزه‌های به‌کارگیری هوش مصنوعی در صنعت برق، بخش تولید انرژی الکتریکی است. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در این حوزه می‌تواند نقش قابل‌توجهی در بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی، افزایش بازدهی، کاهش هزینه‌های سوخت و تعمیرات، و ارتقای قابلیت اطمینان واحدهای تولیدی ایفا کند. در ادامه، به مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در بخش تولید انرژی پرداخته می‌شود.

1 . پیش‌بینی بار (Load Forecasting)

پیش‌بینی بار یکی از حیاتی‌ترین مسائل در برنامه‌ریزی تولید برق است. دقت بالا در پیش‌بینی تقاضای آینده، به اپراتورها این امکان را می‌دهد تا بهره‌برداری از نیروگاه‌ها را بهینه کنند و از راه‌اندازی‌های مکرر و ناپایداری شبکه جلوگیری شود. در این زمینه، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، درخت تصمیم (Decision Trees) و روش‌های یادگیری عمیق عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان داده‌اند [۱۶], [۱۷], [۱۸], [۱۹].

این مدل‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی بار، شرایط آب‌وهوایی و الگوهای مصرف، پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه می‌دهند که موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود بهره‌وری می‌شود. به‌ویژه مدل‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (LSTM) در پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت توانسته‌اند به نتایج چشمگیری دست یابند [۲۰].

همچنین، مدل‌های هراس‌پذیر (Ensemble Models) که با ترکیب نتایج چندین مدل مختلف ساخته می‌شوند، در بسیاری از مطالعات به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین ابزارها در پیش‌بینی بار مطرح شده‌اند. این مدل‌ها با کاهش ریسک خطاهای ناشی از یک مدل واحد، دقت پیش‌بینی را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهند [۱۹].

2. کنترل بهینه نیروگاه‌ها (Optimal Power Plant Control)

در بهینه‌سازی نیروگاه‌ها، تصمیم‌گیری درخصوص زمان راه‌اندازی و خاموشی واحدها، توزیع بار بهینه و مدیریت هزینه‌ها، اهمیت ویژه‌ای دارد. الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای حل مسائل تعهد واحد (Unit Commitment) و برنامه‌ریزی اقتصادی تولید (Economic Dispatch) به‌کار گرفته می‌شوند [۲۱], [۲۲].

الگوریتم ژنتیک با الهام از فرآیندهای تکاملی طبیعی، به تخصیص بهینه منابع و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کند. از سوی دیگر، الگوریتم ازدحام ذرات که بر پایه رفتار جمعی ذرات عمل می‌کند، توانایی بالایی در حل مسائل چندهدفه دارد و برای تخصیص ظرفیت تولید و بهینه‌سازی مصرف سوخت بسیار مؤثر است. علاوه بر این، یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) نیز در این حوزه مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، مدل هوش مصنوعی با یادگیری مداوم از بازخورد محیط، به‌صورت خودکار سیاست‌های بهینه را برای بهره‌برداری نیروگاه‌ها اتخاذ می‌کند [۲۳].

۳. نگهداری پیش‌بینانه (Predictive Maintenance)

نگهداری پیش‌بینانه به معنای پیش‌بینی زمان خرابی تجهیزات و تعمیر یا تعویض به‌موقع آن‌ها، پیش از وقوع خرابی‌های ناگهانی است. این نوع نگهداری، هزینه‌های تعمیرات را کاهش داده و از توقفات پیش‌بینی‌نشده جلوگیری می‌کند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و XGBoost، با تحلیل داده‌های سنسورهای عملیاتی نظیر دما، فشار، لرزش و جریان، قادر به شناسایی الگوهای غیرعادی و پیش‌بینی زمان باقی‌مانده تا خرابی (RUL) تجهیزات هستند [۲۴], [۲۵]. همچنین، شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و LSTM به‌ویژه در پردازش داده‌های زمانی برای پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی عملکرد بسیار خوبی دارند [۱۶], [۲۲]. افزون بر این، مدل‌های بدون نظارت نظیر Autoencoderها نیز توانایی شناسایی خودکار ناهنجاری‌ها را دارند و می‌توانند در تشخیص زودهنگام خرابی‌ها مؤثر واقع شوند.

مزایای کلیدی نگهداری پیش‌بینانه عبارتند از:

- کاهش چشمگیر هزینه‌های تعمیرات؛
- افزایش طول عمر تجهیزات؛
- کاهش زمان توقف نیروگاه و افزایش قابلیت اطمینان عملکرد.

به‌طور کلی، به‌کارگیری هوش مصنوعی در بخش‌های پیش‌بینی بار، کنترل نیروگاه‌ها و نگهداری پیش‌بینانه منجر به بهینه‌سازی عملکرد، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری در تولید انرژی الکتریکی شده است. این فناوری‌ها، بستر مناسبی برای توسعه نیروگاه‌های هوشمند، پایدار و سازگار با شبکه‌های نوین فراهم می‌آورند [۱۹].

کاربرد هوش مصنوعی در انتقال انرژی الکتریکی

سیستم انتقال انرژی الکتریکی، حلقه میانی بین تولید و مصرف است که وظیفه جابه‌جایی مطمئن و پایدار انرژی از نیروگاه‌ها به مراکز مصرف را بر عهده دارد. عملکرد بهینه این بخش برای حفظ تعادل بار، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، حیاتی است. پیچیدگی شبکه‌های انتقال، گستردگی جغرافیایی و وابستگی شدید به شرایط محیطی، نیاز به نظارت مستمر، تصمیم‌گیری سریع و واکنش بهینه را دوچندان کرده است. در این میان، هوش مصنوعی با قابلیت پردازش داده‌های عظیم، استخراج الگو و تصمیم‌سازی بلادرنگ، نقش کلیدی در بهبود عملکرد شبکه انتقال ایفا می‌کند [۲۶].

۱. تشخیص و مکان‌یابی خطا (Fault Detection and Localization)

سیستم‌های انتقال انرژی به دلیل پیچیدگی‌ها و گستردگی‌شان، همواره در معرض انواع مختلف خطاها و خرابی‌ها قرار دارند. تشخیص سریع و دقیق خطاها در خطوط فشار قوی، ترانسفورماتورها و سایر تجهیزات حیاتی سیستم انتقال از اهمیت زیادی برخوردار است. این وظیفه معمولاً به‌صورت دستی یا از طریق سیستم‌های نظارت پیشرفته انجام می‌شود، اما هوش مصنوعی با توانایی پردازش سریع داده‌ها و تشخیص خودکار الگوها، می‌تواند دقت و سرعت تشخیص خطا را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد [۲۷], [۲۸], [۲۹].

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم‌های درخت تصمیم (Decision Trees) به‌ویژه در شناسایی الگوهای پیچیده داده‌ها مفید هستند. این مدل‌ها می‌توانند با تحلیل داده‌های لحظه‌ای مانند ولتاژ، جریان، زاویه فاز، نویز و لرزش از حسگرها، نوع خطا، محل وقوع آن و شدت آن را به‌سرعت شبیه‌سازی کنند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) مانند شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) و(LSTM (Long Short-Term Memory در تحلیل شکل موج‌های گذرا (Transient

Waveforms) و شبیه‌سازی شرایط زمانی پیچیده کاربرد دارند. این الگوریتم‌ها قادرند تا خطاهای گذرا را که ممکن است در سیستم‌های انتقال به وجود آید، شبیه‌سازی کرده و دقت تشخیص را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهند [۳۰].

استفاده از این تکنیک‌ها موجب کاهش زمان تشخیص خطا و جلوگیری از گسترش خاموشی در شبکه می‌شود. همچنین، زمانی که خطا به سرعت شناسایی شود، تیم‌های تعمیر و نگهداری قادرند فوراً وارد عمل شوند و از هزینه‌های اضافی ناشی از خرابی‌های گسترده جلوگیری کنند.

۲. نظارت وضعیت تجهیزات انتقال (Condition Monitoring)

تجهیزات موجود در سیستم‌های انتقال انرژی مانند ترانسفورماتورها، بریکرها، عایق‌ها، کابل‌ها و سایر تجهیزات کلیدی در معرض شرایط مختلفی مانند فرسایش، گرما، رطوبت، آلودگی و تنش‌های الکتریکی قرار دارند. این شرایط می‌تواند به تدریج باعث کاهش عملکرد و حتی خرابی این تجهیزات شود. از این‌رو، استفاده از هوش مصنوعی برای نظارت وضعیت تجهیزات و پیش‌بینی خرابی‌ها پیش از وقوع آن‌ها اهمیت زیادی دارد [۳۱].

الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و Gradient Boosting با پردازش داده‌های سیستم‌های SCADA و حسگرهای نصب‌شده، به‌طور مداوم وضعیت تجهیزات را ارزیابی کرده و می‌توانند به‌سرعت تشخیص دهند که کدام تجهیزات نیاز به سرویس یا تعویض دارند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های بلادرنگ و یادگیری از الگوهای تاریخچه‌ای خرابی، قادرند هشدارهای پیش‌بینانه صادر کنند [۲۸]. به‌طور مثال، اگر ترانسفورماتوری در معرض بار اضافی یا گرمای بیش از حد باشد، این الگوریتم‌ها قادرند آن را شناسایی کرده و به اپراتورها هشدار دهند تا اقدامات پیشگیرانه‌ای صورت گیرد. این نوع پایش پیش‌بینانه منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود، زیرا هزینه‌های مرتبط با تعمیرات اضطراری به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند و عمر تجهیزات نیز افزایش می‌یابد [۳۲].

۳. بهینه‌سازی پخش بار و پایداری سیستم (Load Flow & Stability Optimization)

شبکه‌های انتقال انرژی در شرایطی که به دلیل نوسانات بار یا تولید متغیر انرژی تجدیدپذیر تحت فشار قرار می‌گیرند، نیاز به حفظ تعادل و پایداری دینامیکی سیستم دارند. هوش مصنوعی با الگوریتم‌های پیشرفته مانند:

PSO(Particle Swarm Optimization), GA(Genetic Algorithm) و یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) می‌تواند در پیش‌بینی و پخش بهینه بار، تنظیمات حفاظتی و افزایش توان انتقال قابل‌اعتماد (ATC) نقش مهمی ایفا کند [۲۶].

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند PSO و GA از مدل‌های جست‌وجو و بهینه‌سازی تکاملی استفاده می‌کنند که به‌طور خودکار بهترین راه‌حل‌های ممکن را برای پخش بار و تعیین مسیر انتقال انرژی پیدا می‌کنند. این الگوریتم‌ها می‌توانند بهترین تنظیمات حفاظتی شبکه و مسیرهای انتقال انرژی را پیشنهاد دهند تا از بروز اضافه‌بار، فروپاشی ولتاژ و قطع پی‌درپی جلوگیری کنند. یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) به‌ویژه در پایداری دینامیکی سیستم و پیش‌بینی شرایط بار به‌کار می‌رود [۳۱]. این الگوریتم‌ها می‌توانند به‌طور لحظه‌ای تصمیمات بهینه برای مدیریت انتقال انرژی اتخاذ کنند و با تحلیل رفتار سیستم در زمان واقعی، بهترین مسیرهای انتقال را پیشنهاد دهند. استفاده از این فناوری‌ها به سیستم‌های انتقال این امکان را می‌دهد که در مواجهه با نوسانات بار یا تولید متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر، پایداری سیستم حفظ شده و از اضافه‌بار شبکه جلوگیری شود [۳۱].

در نهایت، هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار کلیدی و پیشرفته در هوشمندسازی شبکه‌های انتقال انرژی شناخته می‌شود. این فناوری با قابلیت‌های خود در نظارت وضعیت تجهیزات، تشخیص و مکان‌یابی خطا، و بهینه‌سازی پخش بار و پایداری سیستم، می‌تواند به بهبود عملکرد، کاهش خرابی‌ها و افزایش تاب‌آوری شبکه کمک کند [۲۶]. تلفیق مدل‌های یادگیری ماشین با سیستم‌های SCADA، PMU (Phasor Measurement Units) و IoT نه‌تنها شبکه‌های انتقال را به‌سمت هوشمندی بیشتر هدایت می‌کند، بلکه بستر مناسبی برای ایجاد شبکه‌های انتقال هوشمند و پایدار در آینده فراهم می‌آورد [۳۲].

کاربرد هوش مصنوعی در توزیع انرژی الکتریکی

شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی آخرین مرحله در زنجیره تأمین برق‌اند و وظیفه تحویل انرژی به مصرف‌کنندگان نهایی را بر عهده دارند. این سیستم‌ها به علت گستردگی جغرافیایی، تغییرات مداوم بار، حضور منابع تولید پراکنده (DERs) و تنوع بارهای متصل، با چالش‌های بسیاری در زمینه پایش، کنترل و بهره‌برداری بهینه روبه‌رو هستند [۳۳]. در این میان، هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان ابزاری نوین، قادر است با تحلیل بلادرنگ داده‌های پیچیده، فرآیندهای تصمیم‌گیری را به‌شدت بهبود بخشد و پایداری سیستم را ارتقا دهد.

۱. مدیریت مصرف و شبکه‌های هوشمند (Smart Grids & Demand Side Management)

در معماری سنتی شبکه‌های توزیع، مصرف‌کنندگان فقط دریافت‌کننده انرژی بودند، اما با توسعه زیرساخت‌های هوشمند، مفهوم مصرف‌کننده فعال یا Prosumer مطرح شده است؛ یعنی فردی که هم مصرف می‌کند و هم تولید می‌نماید (مانند کاربر دارای پنل خورشیدی). هوش مصنوعی در این زمینه با تحلیل داده‌های کنتورهای هوشمند، تاریخچه مصرف، قیمت لحظه‌ای برق و شرایط آب‌وهوایی، به تعیین بهترین زمان برای مصرف یا ذخیره انرژی کمک می‌کند [۳۴]. مدل‌هایی نظیر LSTM، XGBoost و Decision Trees برای پیش‌بینی الگوی بار مصرفی در سطح مشترکین به کار می‌روند. همچنین، در پاسخ به تقاضا Demand Response، AI می‌تواند بارهای قابل کنترل را در زمان‌های پیک خاموش کرده یا جابه‌جا کند تا هزینه مصرف و فشار شبکه کاهش یابد. این امر با کمک سیستم‌های یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) یا مدل‌های قیمت‌گذاری پویا قابل اجراست [۳۵].

۲. ادغام منابع تولید پراکنده (DERs) و انرژی‌های تجدیدپذیر

افزایش منابع تولید پراکنده مانند پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری‌های ذخیره‌سازی انرژی، موجب شده است که شبکه‌های توزیع از حالت مصرف‌محور به شبکه‌هایی دوسویه تبدیل شوند. این ساختار جدید با خود چالش‌هایی مانند نوسان ولتاژ، پدیده جریان معکوس، و افزایش حساسیت حفاظتی به همراه دارد [۳۴].

مدل‌های AI با استفاده از داده‌های محیطی مانند تابش خورشید، دما، سرعت باد، میزان ذخیره باتری و بار محلی، می‌توانند تولید این منابع را پیش‌بینی و در لحظه تنظیم کنند. برای مثال:

- مدل‌های ترکیبی CNN + LSTM برای پیش‌بینی توان خروجی خورشیدی،
- الگوریتم‌های کنترل تطبیقی هوشمند برای تنظیم توان راکتیو و تعادل ولتاژ در سطح محلی،
- و Multi-agent systems برای هماهنگی میان چندین DER.

این روش‌ها باعث می‌شوند که حتی در حضور تولید ناپایدار، شبکه بتواند پایدار باقی بماند و از اختلالات گسترده جلوگیری شود [۳۵].

۳. تشخیص و پیش‌بینی خطا در شبکه‌های توزیع

به علت تنوع تجهیزاتی، موقعیت‌های محیطی گوناگون و عمر بالای برخی زیرساخت‌ها، شبکه‌های توزیع بیشتر از سایر بخش‌ها در معرض خطاهای پنهان یا ناگهانی قرار دارند. این خطاها اگر سریع تشخیص داده نشوند، می‌توانند منجر به خاموشی‌های منطقه‌ای و آسیب به تجهیزات شوند.

با استفاده از الگوریتم‌های SVM، Random Forest، Autoencoder و Isolation Forest، سیستم‌های هوشمند قادرند:

- از طریق داده‌های SCADA و حسگرهای ولتاژ/جریان،
- بروز ناهنجاری‌ها را در مراحل ابتدایی شناسایی کرده،
- نوع خطا (اتصال کوتاه، قطعی فاز، نشتی زمین) و محل وقوع آن را مشخص کنند [۳۳], [۳۶], [۳۷].

همچنین، مدل‌های RUL (Remaining Useful Life) با بررسی روند تغییرات داده‌های سنسورها، زمان باقی‌مانده تا خرابی قطعاتی مانند ترانسفورماتورها، کابل‌های زیرزمینی یا کلیدهای قدرت را پیش‌بینی می‌کنند و تعمیرات پیشگیرانه را ممکن می‌سازند [۳۶].

هوش مصنوعی در سیستم توزیع برق، نه‌تنها ابزاری برای تحلیل داده‌ها، بلکه زیرساختی کلیدی برای شبکه‌سازی تطبیقی، بهره‌وری بیشتر، کاهش هزینه‌های عملیاتی، و ارتقای تاب‌آوری سیستم محسوب می‌شود. شبکه‌های توزیع آینده، با ادغام AI، IoT و زیرساخت‌های دیجیتال، به سمت خودکارسازی کامل، کنترل محلی هوشمند، و پاسخ‌گویی لحظه‌ای به نیازهای شبکه و مصرف‌کننده حرکت خواهند کرد [۳۷].

نتیجه گیری مقاله :

هوش مصنوعی در سال‌های اخیر به یکی از ستون‌های تحول دیجیتال در صنعت برق تبدیل شده است. این فناوری با بهره‌گیری از توانایی تحلیل داده‌های کلان، یادگیری از الگوهای گذشته، و تصمیم‌گیری هوشمند، توانسته است نقش چشم‌گیری در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های قدرت ایفا کند. همان‌طور که در این مقاله بررسی شد، در بخش تولید انرژی الکتریکی، هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی دقیق بار، کنترل بهینه واحدهای نیروگاهی و نگهداری پیش‌بینانه از تجهیزات را فراهم کرده است. در بخش انتقال، الگوریتم‌های هوشمند در تشخیص خطا، پایش وضعیت و مدیریت پایداری سیستم عملکردی مؤثر از خود نشان داده‌اند. همچنین در بخش توزیع، AI با تسهیل در پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند، ادغام منابع تجدیدپذیر و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، بستری برای توسعه پایدار فراهم کرده است.

نتایج حاصل از مرور مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی نه‌تنها موجب ارتقای کارایی فنی و اقتصادی سیستم‌های قدرت می‌شود، بلکه نقش کلیدی در کاهش آلاینده‌ها، بهینه‌سازی مصرف منابع و حرکت به‌سوی سیستم‌های انرژی پاک و هوشمند ایفا می‌کند. با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر، چالش‌هایی نظیر کیفیت داده، امنیت سایبری، پیچیدگی مدل‌ها و نیاز به تفسیرپذیری نتایج همچنان باقی است. بنابراین، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های هوش مصنوعی در صنعت برق، لازم است پژوهش‌های آینده بر توسعه الگوریتم‌های دقیق‌تر، قابل‌اعتمادتر و بومی‌سازی‌شده متمرکز شوند.

منابع و مراجع:

[1] V. Castro, M. Georgiou, T. Jackson, I. R. Hodgkinson, L. Jackson, S. Lockwood, Energy Policy. 2024, 195, 114404.

[2] T. U. Badrudeen, N. I. Nwulu, S. L. Gbadamosi, Energy Strategy Reviews. 2024, 52, 101337.

[3] Q. Salem, B. B. Fawaz, R. Aljarrah, M. Karimi, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2025, 6, 775–801.

[4] M. M. Islam, T. Yu, G. Giannoccaro, Y. Mi, M. la Scala, and M. R. Nasab, "Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility,vol. 12, pp. 152738–152765, Oct. 2024.

[5] M. L. Di Silvestre, S. Favuzza, E. R. Sanseverino, G. Zizzo, Renewable Sustainable Energy Rev. 2018, 93, 483–498.

[6] H. Zsiborács, N. H. Baranyai, A. Vincze, L. Zentkó, Z. Birkner, K. Máté, and G. Pintér, “Intermittent renewable energy sources: The role of energy storage in the European power system of 2040,” *Electronics*, vol. 8, no. 7, p. 729, Jun. 2019.

[7] H. Abdi, M. M. Amiri, M. Rezaei, and M. Shahbazitabar, "An Introduction to Artificial Intelligence Applications in Power Systems," in *Artificial Intelligence in the Operation and Control of Digitalized Power Systems*, pp. 69–87, Nov. 2024.

[8] X. Zhao and X. Zhang, "Artificial intelligence applications in power system," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Artificial Intelligence and Industrial Engineering (AIIE 2016)*, pp. 158–161, 2016.

[9] I. Alhamrouni, N. H. A. Kahar, M. Salem, M. Swadi, Y. Zahroui, D. J. Kadhim, F. A. Mohamed, and M. A. Nazari, "A comprehensive review on the role of artificial intelligence in power system stability, control, and protection: Insights and future directions," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 14, p. 6214, 2024.

[10] M. A. Majeed, S. Phichaisawat, F. Asghar, and U. Hussan, "Data-driven optimized load forecasting: An LSTM based RNN approach for smart grids," *IEEE Access*, 2025.

[11] A. Azeem, I. Ismail, S. S. Mohani, K. U. Danyaro, U. Hussain, S. Shabbir, and R. Z. B. Jusoh, "Mitigating concept drift challenges in evolving smart grids: An adaptive ensemble LSTM for enhanced load forecasting," *Energy Reports*, vol. 13, pp. 1369–1383, 2025.

[12] J. J. Moreno Escobar, O. M. Matamoros, R. T. Padilla, I. L. Reyes, and H. Q. Espinosa, "A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 6978, Oct. 2021.

[13] M. Kumar and B. Patra, "Smart grid technologies: A comprehensive review," *Turkish J. Comput. Math. Educ.*, vol. 11, no. 3, pp. 2895–2899, Dec. 2020.

[14] B. E. Yağcı, G. Demirsoy, and A. N. Akpolat, "General overview of artificial neural network applications in renewable energy systems," *Turk. J. Electromech. Energy*, vol. 9, pp. 95–107, 2024.

[15] V. J. Patil, S. B. Khadake, D. A. Tamboli, H. M. Mallad, S. M. Takpere, and V. J. Sawant, "A comprehensive analysis of artificial intelligence integration in electrical engineering," in *Proc. 5th Int. Conf. on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)*, pp. 484–491, 2024.

[16] V. Melinda, T. Williams, J. Anderson, G. Davies, and C. Davis, "Enhancing waste-to-energy conversion efficiency and sustainability through advanced artificial intelligence integration," *Int. Trans. Educ. Technol. (ITEE)*, vol. 2, no. 2, pp. 183–192, 2024.

[17] O. Oguntola, K. Boakye, and S. Simske, "Towards leveraging artificial intelligence for sustainable cement manufacturing: A systematic review of AI applications in electrical energy consumption optimization," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, p. 4798, 2024.

[18] B. Yan, Y. Luo, P. Tao, and P. Hu, "Data-driven smart grid optimization: Innovative applications and performance graphs of AI algorithms in electricity load forecasting," in *Proc. 2025 Int. Conf. on Power Electronics and Electric Drives (PEED)*, pp. 8–12, 2025.

[19] A. Ahamed, N. Ahmed, J. I. Janjua, Z. Hossain, E. Hasan, and T. Abbas, "Advances and evaluation of intelligent techniques in short-term load forecasting," in *Proc. 2024 Int. Conf. on Computer and Applications (ICCA)*, pp. 1–9, 2024.

[20] J. Wen, Z. Liu, G. Wang, X. Zhang, Y. Xu, R. Li, Y. Liu, and Z. Lin, "A review of research on power system load forecasting methods," in *Proc. 2024 5th Int. Conf. on Smart Grid and Energy Engineering (SGEE)*, pp. 55–61, 2024.

[21] F. Rouhi and R. Effatnejad, "Unit commitment in power system by combination of dynamic programming (DP), genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO)," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 134–141, 2015.

[22] S. Janefar, P. Chowdhury, R. Yeassin, M. Hasan, and N.-U.-R. Chowdhury, “Comparative performance evaluation of economic load dispatch using metaheuristic techniques: A practical case study for Bangladesh,” Results in Engineering, vol. 26, p. 104720, 2025.

[23] P. Mohammadi, R. Darshi, H. Gohari Darabkhani, and S. Shamaghdari, “Multiagent Energy Management System Design Using Reinforcement Learning: The New Energy Lab Training Set Case Study,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 2025, no. 1, p. 3574030, 2025.

[24] A. M. Suci, R. Amini, A. K. Asri, and N. Martin, “Artificial Intelligence in Renewable Energy: A Review of Predictive Maintenance and Energy Optimization,” J. Clean Technol., vol. 2, no. 1, pp. 29–44, 2025.

[25] M. H. H. Amjad, B. R. Chowdhury, S. A. Reza, M. S. Sadik, M. K. Shovon, M. R. Islam, M. H. Ridoy, M. A. Rahman, and S. J. Ripa, “AI-Powered Fault Detection in Gas Turbine Engines: Enhancing Predictive Maintenance in the US Energy Sector,” J. Ecohumanism, vol. 4, no. 4, pp. 658–678, 2025.

[26] M. Cavus, “Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration,” Electronics, vol. 14, no. 6, p. 1159, 2025.

[27] M. A. Adewoyin, O. Adedwin, and J. Audu, “Artificial intelligence and sustainable energy development: A review of applications, challenges, and future directions,” International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, vol. 6, no. 2, pp. 196–203, 2025.

[28] C. Khadse, A. A. Patharkar, and B. S. Chaudhari, “Electromagnetic field and artificial intelligence based fault detection and classification system for the transmission lines in smart grid,” Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol. 47, no. 1, pp. 9362–9376, 2025.

[29] M. Li, D. Yu, S. S. Yu, X. Li, and H. Geng, “Enhanced Fault Detection, Localization, and Tolerance Strategy for Dual Active Bridge DC–DC Converters Through Frequency-Domain Analysis of Remote Voltage,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025.

[30] P. Arévalo and F. Jurado, “Impact of artificial intelligence on the planning and operation of distributed energy systems in smart grids,” Energies, vol. 17, no. 17, p. 4501, 2024.

[31] Y. Li, Y. Ding, S. He, F. Hu, J. Duan, G. Wen, H. Geng, Z. Wu, H. B. Gooi, Y. Zhao, C. Zhang, S. Mei, and Z. Zeng, “Artificial intelligence-based methods for renewable power system operation,” Nature Reviews Electrical Engineering, vol. 1, no. 3, pp. 163–179, 2024.

[32] T. S. Hlalele, “Smart Grid Enhancements: AI Approaches for Sustainable Power Transmission,” 2025 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), pp. 1–8, 2025.

[33] V. Yuvaraju, S. Thangavel, and M. Golla, “Applications of artificial intelligence and PMU data: A robust framework for precision fault location in transmission lines,” IEEE Access, 2024.

[34] Y. Chen, X. Fan, R. Huang, Q. Huang, A. Li, and K. P. Guddanti, “Artificial intelligence/machine learning technology in power system applications,” Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States), 2024.

[35] M. Rauf, L. Kumar, S. A. Zulkifli, and A. Jamil, “Aspects of artificial intelligence in future electric vehicle technology for sustainable environmental impact,” Environmental Challenges, vol. 14, p. 100854, 2024.

[36] S. M. Miraftabzadeh, M. Longo, A. Di Martino, A. Saldarini, and R. S. Faranda, “Exploring the synergy of artificial intelligence in energy storage systems for electric vehicles,” Electronics, vol. 13, no. 10, p. 1973, 2024.

[37] L. D. Jathar, K. Nikam, U. V. Awasarmol, R. Gurav, J. D. Patil, K. Shahapurkar, M. E. M. Soudagar, T. M. Y. Khan, M. A. Kalam, A. Hnydiuk-Stefan, A. E. Gürel, A. T. Hoang, and Ü. Ağbulut, “A comprehensive analysis of the emerging modern trends in research on photovoltaic systems and desalination in the era of artificial intelligence and machine learning,” Heliyon, vol. 10, no. 3, 2024.