

همگرایی اینترنت اشیا و شبکه هوشمند برق؛ گامی به سوی مدیریت پایدار انرژی

آیلین جهانشاهی^۱ aylin.jahanshahi@iau.ir

سیمین خضرای شولای فر^۲ si.khazraei@iau.ac.ir (نویسنده مسئول)

^{۱و۲} گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده: با افزایش مصرف انرژی، گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر و نیاز روزافزون به هوشمندسازی شبکه‌های برق، استفاده از فناوری‌های نوین در سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی پیدا کرده است. شبکه هوشمند برق به‌عنوان نسل جدید شبکه‌های برق، با بهره‌گیری از فناوری اطلاعات و ارتباطات، امکان پایش، کنترل و مدیریت بهینه تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی را فراهم می‌کند. در این میان، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات و دستگاه‌های مختلف، امکان جمع‌آوری، انتقال و پردازش داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای فراهم می‌سازد. در این مقاله کاربرد اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، معماری و اجزای آن، تجهیزات و فناوری‌های مورد استفاده، کاربردهای مختلف، مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی بررسی شده است. همچنین نقش فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه‌های ارتباطی پیشرفته، رایانش لبه‌ای و دوقلوی دیجیتال در توسعه آینده شبکه‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اینترنت اشیا می‌تواند با بهبود پایش و مدیریت شبکه، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان، نقش مهمی در توسعه شبکه‌های برق هوشمند ایفا کند.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیا، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه هوشمند برق، مدیریت انرژی، هوش مصنوعی

۱. مقدمه

با افزایش جمعیت، رشد صنایع و افزایش وابستگی جوامع به انرژی الکتریکی، مدیریت بهینه و پایدار شبکه‌های برق به یکی از چالش‌های مهم صنعت انرژی تبدیل شده است. شبکه‌های برق سنتی که عمدتاً بر تولید متمرکز و انتقال یک‌طرفه انرژی متکی هستند، در برابر نیازهای جدید مانند افزایش مصرف، ورود منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان، با محدودیت‌هایی مواجه شده‌اند. به همین دلیل، حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند برق به‌عنوان یک راهکار اساسی برای توسعه سیستم‌های قدرت آینده مورد توجه قرار گرفته است [1-4]. شبکه هوشمند برق با ترکیب زیرساخت‌های سنتی قدرت و فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات، امکان پایش، کنترل و مدیریت بهتر جریان انرژی را فراهم می‌کند. در این ساختار، تبادل اطلاعات میان تولیدکنندگان، تجهیزات شبکه و مصرف‌کنندگان نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری سیستم دارد. برای تحقق این هدف، استفاده از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا^۵ (IoT)، هوش مصنوعی، رایانش ابری و شبکه‌های ارتباطی پیشرفته ضروری است [5]. اینترنت اشیا یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در شبکه‌های هوشمند برق است که با ایجاد ارتباط میان تجهیزات مختلف، امکان جمع‌آوری، انتقال و تحلیل داده‌ها را به صورت لحظه‌ای فراهم می‌کند [6]. تجهیزات مبتنی بر IoT مانند حسگرهای هوشمند، کنترلرهای هوشمند

^۶ Smart grids

^۷ Internet of Things

و سامانه‌های پایش شبکه، اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهند [7]. این اطلاعات می‌تواند برای مدیریت مصرف، تشخیص خطا، نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار گیرد [8]. با وجود مزایای فراوان، استفاده گسترده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق با چالش‌هایی مانند امنیت سایبری، حفاظت از داده‌ها، استانداردسازی ارتباطات و هزینه‌های پیاده‌سازی روبه‌رو است. بنابراین بررسی فرصت‌ها و محدودیت‌های این فناوری برای توسعه شبکه‌های برق آینده اهمیت زیادی دارد. هدف این مقاله، بررسی کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، معرفی معماری و تجهیزات مورد استفاده، بررسی مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی و همچنین بررسی مسیرهای توسعه آینده این فناوری است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که IoT می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری، پایداری و هوشمندسازی سیستم‌های قدرت ایفا کند.

۲. معماری و اجزای IOT در شبکه هوشمند برق

استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق نیازمند یک معماری منظم برای جمع‌آوری، انتقال، پردازش و استفاده از داده‌ها است. معماری IoT در شبکه هوشمند معمولاً شامل چندین لایه اصلی است که هرکدام وظیفه مشخصی در فرآیند ارتباط و مدیریت اطلاعات دارند. این معماری باعث می‌شود تجهیزات مختلف شبکه برق بتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و اطلاعات مورد نیاز برای کنترل و تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم کنند.

۲-۱. لایه تجهیزات و جمع‌آوری داده^۸

این لایه شامل تجهیزات فیزیکی مانند حسگرها، تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند، کنترلرهای هوشمند و تجهیزات پایش شبکه است. وظیفه اصلی این بخش، جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت شبکه برق است. برای مثال، حسگرها می‌توانند پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، توان مصرفی، دما و وضعیت تجهیزات را اندازه‌گیری کنند. در شبکه هوشمند برق، این تجهیزات امکان مشاهده لحظه‌ای شرایط شبکه را فراهم می‌کنند. داده‌های جمع‌آوری شده از این مرحله برای تشخیص مشکلات، مدیریت مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲. لایه ارتباط و انتقال داده^۹

پس از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها باید به مراکز پردازش و کنترل منتقل شوند. این وظیفه بر عهده لایه ارتباطی است. فناوری‌هایی مانند شبکه‌های بی‌سیم، فیبر نوری، شبکه‌های سلولی، Wi-Fi، ZigBee و ارتباطات مبتنی بر اینترنت در این بخش استفاده می‌شوند. انتخاب روش ارتباطی مناسب به عواملی مانند سرعت انتقال داده، میزان تأخیر، هزینه، امنیت و شرایط محیطی بستگی دارد. در شبکه هوشمند برق، ارتباط پایدار و امن اهمیت زیادی دارد، زیرا هرگونه اختلال در انتقال اطلاعات می‌تواند عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۴. لایه پردازش و مدیریت داده^{۱۰}

در این لایه، داده‌های دریافت شده از تجهیزات مختلف ذخیره، پردازش و تحلیل می‌شوند. با توجه به حجم زیاد اطلاعات تولیدشده توسط تجهیزات IoT، استفاده از فناوری‌هایی مانند رایانش ابری^{۱۱}، پردازش لبه‌ای^{۱۲} و الگوریتم‌های هوش مصنوعی اهمیت زیادی پیدا

^۸ Perception Layer

^۹ Communication Layer

^۱ Data Processing Layer

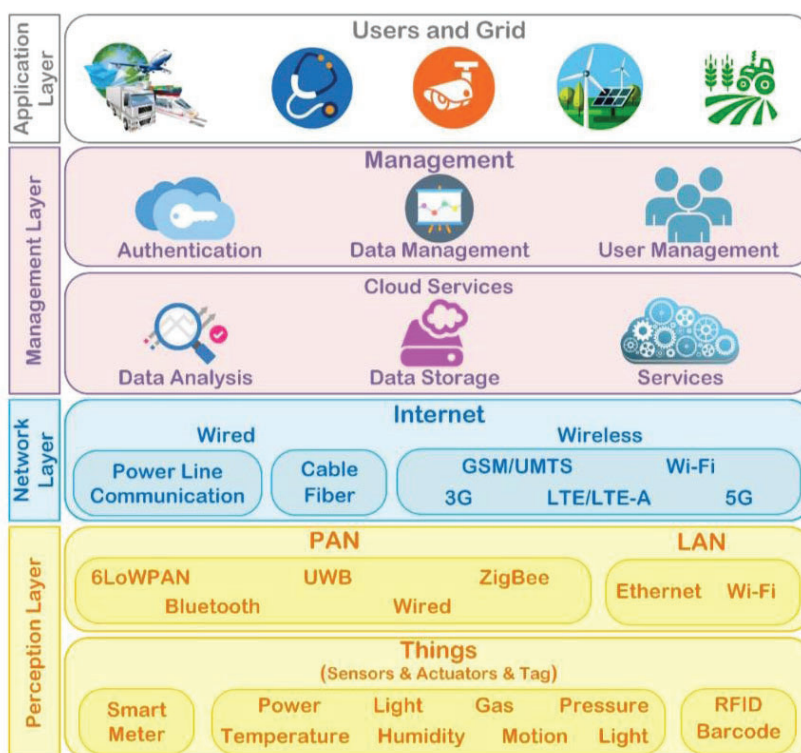
^۱ Cloud Computing

^۱ Edge Computing

کرده است. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای مصرف، پیش‌بینی خرابی تجهیزات، مدیریت بار شبکه و تصمیم‌گیری سریع‌تر کمک کند.

۴-۴. لایه کاربرد و کنترل^{۱۳}

این لایه شامل سامانه‌هایی است که از اطلاعات پردازش‌شده برای ارائه خدمات هوشمند استفاده می‌کنند. برخی از کاربردهای این بخش شامل مدیریت انرژی، پایش وضعیت شبکه، کنترل تجهیزات از راه دور، تشخیص خطا و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر است. در واقع، این لایه همان بخشی است که نتایج استفاده از IoT را در شبکه برق قابل مشاهده می‌کند و باعث بهبود عملکرد شرکت‌های برق و تجربه بهتر مصرف‌کنندگان می‌شود. معماری اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق از مجموعه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری، شبکه‌های ارتباطی، سامانه‌های پردازشی و برنامه‌های کاربردی تشکیل شده است. هماهنگی میان این اجزا باعث می‌شود شبکه برق بتواند به صورت هوشمند وضعیت خود را پایش کرده، مشکلات را سریع‌تر شناسایی کند و مصرف انرژی را بهینه نماید. به همین دلیل، IoT یکی از فناوری‌های کلیدی برای توسعه شبکه‌های برق آینده محسوب می‌شود. معماری لایه ای اینترنت اشیا در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. معماری لایه ای اینترنت اشیا [1]

¹ Application Eayer

۳. تجهیزات و فناوری‌های مورد استفاده در شبکه هوشمند برق

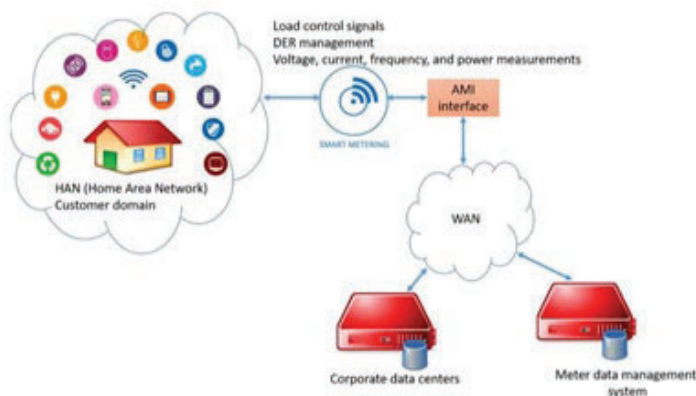
پیاده‌سازی شبکه هوشمند برق نیازمند استفاده از مجموعه‌ای از تجهیزات و فناوری‌های پیشرفته است که امکان جمع‌آوری اطلاعات، برقراری ارتباط، تحلیل داده‌ها و کنترل هوشمند شبکه را فراهم می‌کنند. در این میان، اینترنت اشیا نقش مهمی در اتصال تجهیزات مختلف و ایجاد هماهنگی میان بخش‌های مختلف سیستم قدرت دارد. تجهیزات مبتنی بر IoT باعث می‌شوند شبکه برق بتواند اطلاعات دقیق و لحظه‌ای از وضعیت خود دریافت کرده و عملکرد خود را بهینه کند.

۳-۱. حسگرها و تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند

حسگرها یکی از مهمترین اجزای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق هستند. این تجهیزات وظیفه اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شبکه مانند ولتاژ، جریان، توان، فرکانس، دما و شرایط عملکرد تجهیزات را بر عهده دارند. اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها به مراکز کنترل ارسال شده و برای پایش وضعیت شبکه و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. استفاده از حسگرهای هوشمند امکان پایش لحظه‌ای شبکه را فراهم می‌کند. برای مثال، حسگرهای نصب‌شده روی تجهیزات انتقال و توزیع می‌توانند تغییرات غیرعادی را شناسایی کرده و قبل از وقوع خرابی جدی، هشدار لازم را ارسال کنند. این قابلیت باعث کاهش زمان خاموشی‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق می‌شود.

۳-۲. کنتورهای هوشمند^{۱۴}

کنتورهای هوشمند یکی از شناخته‌شده‌ترین کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه برق هستند. برخلاف کنتورهای سنتی که تنها میزان مصرف انرژی را ثبت می‌کنند، کنتورهای هوشمند قابلیت اندازه‌گیری و ارسال اطلاعات مصرف برق به صورت دوطرفه را دارند. این تجهیزات می‌توانند اطلاعاتی مانند میزان مصرف، زمان مصرف و الگوی استفاده از انرژی را به شرکت‌های برق ارسال کنند. همچنین مصرف‌کنندگان نیز می‌توانند از طریق این اطلاعات، آگاهی بیشتری نسبت به مصرف خود پیدا کرده و مصرف انرژی را مدیریت کنند. نحوه عملکرد و ارتباط کنتور هوشمند با شبکه برق و سامانه‌های ارتباطی در شکل ۲ نشان داده شده است [1].



شکل ۲. معماری زیر ساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) [1]

¹ Smart meters⁴

۳-۳. شبکه‌های ارتباطی و انتقال داده

شبکه‌های ارتباطی، بخش مهمی از زیرساخت IoT در شبکه هوشمند برق هستند زیرا انتقال سریع و امن اطلاعات میان تجهیزات مختلف را امکان‌پذیر می‌کنند. فناوری‌هایی مانند فیبر نوری، شبکه‌های بی‌سیم، اینترنت، شبکه‌های سلولی و پروتکل‌های ارتباطی مخصوص تجهیزات هوشمند در این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک شبکه ارتباطی مناسب باید ویژگی‌هایی مانند سرعت بالا، تأخیر کم، امنیت مناسب و قابلیت پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه متصل را داشته باشد. با توسعه فناوری‌هایی مانند 5G، امکان اتصال تعداد بیشتری از تجهیزات هوشمند و انتقال سریع‌تر داده‌ها در شبکه‌های برق آینده فراهم خواهد شد.

۳-۴. سامانه‌های مدیریت انرژی^{۱۵}

سامانه‌های مدیریت انرژی وظیفه تحلیل اطلاعات دریافت‌شده از تجهیزات مختلف و استفاده از آنها برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه را بر عهده دارند. این سامانه‌ها با کمک فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها می‌توانند الگوی مصرف انرژی را بررسی کرده، بار شبکه را مدیریت کنند و تصمیم‌های مناسب برای بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی اتخاذ نمایند [2]. در شبکه‌های هوشمند، این سامانه‌ها به مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش تلفات، پیش‌بینی مصرف و افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. ترکیب این سامانه‌ها با اینترنت اشیا باعث ایجاد یک محیط هوشمند می‌شود که در آن تجهیزات مختلف قادر به تبادل اطلاعات و همکاری برای عملکرد بهتر شبکه هستند [2]. تجهیزاتی مانند حسگرهای هوشمند، کنترلرهای هوشمند، شبکه‌های ارتباطی و سامانه‌های مدیریت انرژی، پایه‌های اصلی استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق هستند.

۴. کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق

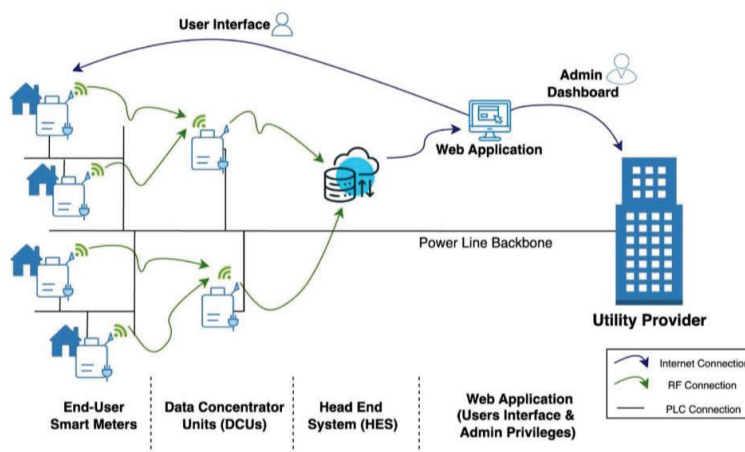
اینترنت اشیا یکی از فناوری‌های کلیدی در توسعه شبکه‌های هوشمند برق است و امکان تبدیل شبکه‌های سنتی به سیستم‌هایی پویا، خودکار و داده‌محور را فراهم می‌کند. با استفاده از تجهیزات متصل به شبکه، اطلاعات مربوط به تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی به صورت لحظه‌ای جمع‌آوری شده و برای کنترل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربردهای IoT در شبکه هوشمند برق باعث افزایش قابلیت اطمینان، کاهش تلفات انرژی، بهبود مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری سیستم قدرت می‌شود [3].

۴-۱. پایش و اندازه‌گیری هوشمند

یکی از مهمترین کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، پایش و اندازه‌گیری هوشمند وضعیت شبکه است. در شبکه‌های برق سنتی، اطلاعات محدودی از شرایط لحظه‌ای تجهیزات وجود دارد و بسیاری از فرآیندهای بررسی وضعیت شبکه به صورت دوره‌ای انجام می‌شوند. این روش باعث می‌شود برخی مشکلات قبل از شناسایی، به خرابی یا قطعی گسترده منجر شوند [3]. با استفاده از فناوری IoT، تعداد زیادی حسگر و تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند در بخش‌های مختلف شبکه مانند نیروگاه‌ها، خطوط انتقال، پست‌های برق و شبکه توزیع نصب می‌شوند. این تجهیزات می‌توانند پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، توان، فرکانس، دما و وضعیت عملکرد تجهیزات را به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری و ارسال کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط این تجهیزات، پس از انتقال به مراکز پردازش، برای تحلیل وضعیت شبکه و تصمیم‌گیری استفاده می‌شوند (شکل ۳).

به عنوان مثال، تغییرات غیرعادی در پارامترهای الکتریکی می‌تواند نشانه وجود مشکل در یک بخش از شبکه باشد و سیستم می‌تواند قبل از ایجاد خرابی جدی، هشدار لازم را صادر کند.

¹ Energy Management Systems



شکل ۳. معماری ارتباطی کنتورهای هوشمند و سامانه پایش [3]

یکی از نمونه‌های مهم این کاربرد، استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری^۱ (PMU) و تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته است. این تجهیزات با ثبت دقیق وضعیت شبکه و ارسال اطلاعات با سرعت بالا، به اپراتورها کمک می‌کنند تا رفتار شبکه را بهتر تحلیل کرده و پایداری سیستم قدرت را افزایش دهند. همچنین کنتورهای هوشمند به عنوان یکی از رایج‌ترین تجهیزات اندازه‌گیری مبتنی بر IoT، امکان ثبت و ارسال اطلاعات مصرف انرژی مشتریان را فراهم می‌کنند. این اطلاعات علاوه بر صدور صورتحساب دقیق‌تر، به شرکت‌های برق در شناخت الگوی مصرف، مدیریت بار و اجرای برنامه‌های کاهش مصرف در ساعات اوج کمک می‌کند. به طور کلی، پایش و اندازه‌گیری هوشمند با کمک اینترنت اشیا باعث افزایش دیدپذیری شبکه برق، کاهش زمان تشخیص مشکلات و فراهم شدن امکان مدیریت دقیق‌تر سیستم قدرت می‌شود. این قابلیت یکی از پایه‌های اصلی ایجاد یک شبکه برق هوشمند و قابل اعتماد در آینده است.

۴-۲. مدیریت مصرف انرژی

یکی از مهمترین اهداف شبکه هوشمند برق، مدیریت بهینه مصرف انرژی و ایجاد تعادل میان تولید و مصرف برق است. افزایش مصرف انرژی، تغییر الگوهای مصرف و محدودیت منابع تولید باعث شده است که روش‌های سنتی مدیریت شبکه پاسخگوی نیازهای آینده نباشند. اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان جمع‌آوری اطلاعات دقیق از رفتار مصرف‌کنندگان و تجهیزات، نقش مهمی در مدیریت هوشمند انرژی ایفا می‌کند. در شبکه‌های هوشمند، کنتورهای هوشمند و تجهیزات متصل به اینترنت اشیا می‌توانند اطلاعات مصرف انرژی را در بازه‌های زمانی مختلف ثبت و به مراکز مدیریت انرژی ارسال کنند. این اطلاعات به شرکت‌های برق اجازه می‌دهد الگوهای مصرف را تحلیل کرده و برنامه‌های مناسبی برای کاهش مصرف در زمان‌های اوج بار طراحی کنند. یکی از روش‌های مهم در این زمینه، پاسخگویی تقاضا^۲ است. در این روش، مصرف‌کنندگان با دریافت اطلاعات مربوط به وضعیت شبکه و قیمت انرژی، می‌توانند زمان مصرف برخی تجهیزات خود را تغییر دهند. برای مثال، در ساعات اوج مصرف، سیستم‌های هوشمند می‌توانند پیشنهاد کاهش مصرف یا انتقال مصرف به ساعات کم‌بار را ارائه دهند. این فرآیند باعث کاهش فشار بر شبکه و افزایش پایداری سیستم برق می‌شود [1].

اینترنت اشیا همچنین امکان کنترل هوشمند تجهیزات خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. در ساختمان‌های هوشمند، تجهیزات مصرف‌کننده مانند سیستم‌های سرمایش و گرمایش، روشنایی و وسایل الکتریکی می‌توانند بر اساس شرایط شبکه و نیاز واقعی کاربران تنظیم شوند. این فرآیند باعث کاهش فشار بر شبکه و افزایش پایداری سیستم برق می‌شود. اینترنت اشیا همچنین امکان کنترل هوشمند تجهیزات خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. در ساختمان‌های هوشمند، تجهیزات مصرف‌کننده مانند سیستم‌های سرمایش و گرمایش،

¹ Phasor Measurement Unit

² Demand Response

روشنایی و وسایل الکتریکی می‌توانند بر اساس شرایط شبکه و نیاز واقعی کاربران تنظیم شوند. این موضوع علاوه بر کاهش مصرف انرژی، موجب افزایش راحتی و کاهش هزینه‌های مصرف‌کنندگان خواهد شد. از طرف دیگر، تحلیل داده‌های بزرگ^۸ تولیدشده توسط تجهیزات IoT می‌تواند برای پیش‌بینی میزان مصرف آینده استفاده شود. ترکیب این داده‌ها با الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان پیش‌بینی بار شبکه و برنامه‌ریزی دقیق‌تر تولید و توزیع انرژی را فراهم می‌کند [3]. در مجموع، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان مصرف‌کنندگان، تجهیزات اندازه‌گیری و سامانه‌های مدیریت انرژی، زمینه را برای مصرف بهینه‌تر برق، کاهش تلفات و بهره‌برداری اقتصادی‌تر از شبکه هوشمند فراهم می‌کند.

۳-۴. مدیریت انرژی های تجدیدپذیر

گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی یکی از اهداف اصلی توسعه شبکه‌های هوشمند برق است [4]. با این حال، تولید انرژی از این منابع به دلیل وابستگی به شرایط محیطی مانند میزان تابش خورشید و سرعت باد، دارای تغییرات و نوسانات زیادی است. به همین دلیل، مدیریت و هماهنگسازی این منابع با شبکه برق نیازمند استفاده از فناوریهای پیشرفته مانند اینترنت اشیا است. اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات تولید انرژی، سیستمهای ذخیرهسازی، شبکه انتقال و مراکز کنترل، امکان پایش لحظه‌ای عملکرد منابع تجدیدپذیر را فراهم میکند [4]. برای مثال، حسگرهای هوشمند نصبشده در نیروگاههای خورشیدی و بادی میتوانند اطلاعاتی مانند میزان تولید، شرایط تجهیزات و وضعیت محیطی را جمع‌آوری کرده و برای تحلیل و کنترل به سامانه های مدیریت انرژی ارسال کنند.

یکی از چالشهای اصلی انرژیهای تجدیدپذیر، عدم تطابق همیشگی میان زمان تولید و زمان مصرف انرژی است. فناوریهای مبتنی بر IoT میتوانند با مدیریت هوشمند تولید، مصرف و ذخیرهسازی انرژی، این مشکل را کاهش دهند. به عنوان مثال، در شبکه‌هایی که دارای باتری‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند، سیستم هوشمند می‌تواند بر اساس وضعیت شبکه تصمیم بگیرد که چه زمانی انرژی ذخیره یا به شبکه تزریق شود. همچنین اینترنت اشیا امکان مدیریت منابع انرژی پراکنده^۹ را فراهم می‌کند. در شبکه‌های مدرن، تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان ممکن است خود تولیدکننده انرژی نیز باشند؛ برای مثال ساختمان‌هایی که دارای پنل خورشیدی هستند. IoT با ایجاد ارتباط میان این منابع کوچک و مرکز مدیریت شبکه، امکان هماهنگی بهتر و استفاده مؤثرتر از انرژی تولیدشده را فراهم می‌سازد. ترکیب اینترنت اشیا با فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها نیز می‌تواند به پیش‌بینی میزان تولید انرژی تجدیدپذیر کمک کند. این پیش‌بینی‌ها به بهره‌برداران شبکه اجازه می‌دهد برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای تولید، توزیع و ذخیره انرژی داشته باشند و پایداری شبکه افزایش یابد. در نتیجه، اینترنت اشیا نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری منابع انرژی تجدیدپذیر دارد و یکی از فناوری‌های ضروری برای حرکت به سمت شبکه‌های برق پایدار و هوشمند در آینده محسوب می‌شود.

۴-۴. تشخیص خطا و نگهداری پیش‌بینانه

یکی از کاربردهای مهم اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، تشخیص سریع خطاها و انجام نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات است. در شبکه‌های برق سنتی، بسیاری از فعالیت‌های تعمیر و نگهداری براساس زمان‌بندی مشخص انجام می‌شوند؛ یعنی تجهیزات در دوره‌های مشخص بررسی می‌شوند، حتی اگر نشانه‌ای از خرابی وجود نداشته باشد. این روش علاوه بر هزینه‌بر بودن، ممکن است باعث شود برخی خرابی‌ها قبل از زمان بررسی دوره‌ای رخ دهند و موجب قطعی یا کاهش کیفیت برق شوند. فناوری اینترنت اشیا با استفاده از حسگرهای هوشمند و تجهیزات پایش آنلاین، امکان مشاهده مداوم وضعیت تجهیزات شبکه را فراهم می‌کند. این حسگرها می‌توانند اطلاعاتی مانند

⁸ Big Data

⁹ Distributed Energy Resources

دما، ارتعاش، جریان، ولتاژ و شرایط عملکرد تجهیزات مختلف مانند ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و تجهیزات پست‌های برق را اندازه‌گیری کنند. داده‌های جمع‌آوری شده پس از تحلیل، می‌توانند نشانه‌های اولیه خرابی را شناسایی کنند. این روش باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات، افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش زمان خاموشی شبکه می‌شود. به عنوان مثال، در یک ترانسفورماتور قدرت، افزایش غیرعادی دما یا تغییر در شرایط کاری می‌تواند نشانه وجود مشکل باشد. سیستم‌های مبتنی بر IoT با دریافت این اطلاعات و تحلیل آن‌ها می‌توانند قبل از وقوع خرابی جدی، هشدار لازم را به مرکز کنترل ارسال کنند [8]. همچنین اینترنت اشیا در تشخیص و مکان‌یابی خطا در شبکه توزیع کاربرد زیادی دارد. تجهیزات هوشمند می‌توانند محل تقریبی وقوع خطا را مشخص کرده و اطلاعات لازم را برای انجام اقدامات اصلاحی در اختیار اپراتورها قرار دهند. این قابلیت باعث کاهش زمان رفع خاموشی و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود [3].

ترکیب IoT با فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، توانایی سیستم‌های تشخیص خطا را افزایش داده است. الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند حجم زیادی از داده‌های شبکه را تحلیل کرده و الگوهایی را شناسایی کنند که تشخیص آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است [5]. در مجموع، استفاده از اینترنت اشیا برای تشخیص خطا و نگهداری پیش‌بینانه، یکی از عوامل مهم افزایش قابلیت اطمینان شبکه هوشمند برق است. این فناوری با کاهش خرابی‌های ناگهانی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش سرعت واکنش به مشکلات، نقش مهمی در ایجاد شبکه‌های برق پایدارتر دارد.

۵. مزایا و دستاوردهای استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق

استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، تغییرات مهمی در نحوه تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی ایجاد کرده است. اتصال تجهیزات مختلف شبکه به یکدیگر و امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها به صورت لحظه‌ای، باعث شده است شبکه برق عملکرد هوشمندتر و انعطاف‌پذیرتری داشته باشد. مهم‌ترین مزایای استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق عبارت‌اند از:

- **افزایش قابلیت اطمینان و پایداری شبکه:** یکی از مهمترین دستاوردهای IoT، افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق است. با استفاده از حسگرها و تجهیزات پایش هوشمند، وضعیت تجهیزات شبکه به صورت مداوم بررسی می‌شود و مشکلات احتمالی می‌توانند قبل از ایجاد خرابی گسترده شناسایی شوند. این قابلیت باعث کاهش زمان خاموشی، افزایش سرعت واکنش به خطاها و بهبود عملکرد سیستم قدرت می‌شود. همچنین اپراتورها می‌توانند با داشتن اطلاعات دقیق تر، تصمیم‌های سریع تر و مناسب تری برای کنترل شبکه اتخاذ کنند.
- **کاهش تلفات انرژی و افزایش بهره‌وری:** یکی از مشکلات شبکه‌های برق سنتی، وجود تلفات در بخش‌های مختلف انتقال و توزیع انرژی است. فناوری IoT با فراهم کردن اطلاعات دقیق درباره وضعیت مصرف، تولید و انتقال انرژی، امکان شناسایی نقاط دارای اتلاف و بهینه‌سازی عملکرد شبکه را فراهم می‌کند. برای مثال، تحلیل داده‌های حاصل از کنتورهای هوشمند می‌تواند الگوهای غیرضروری مصرف را مشخص کرده و به اجرای برنامه‌های مدیریت انرژی کمک کند. این موضوع باعث کاهش مصرف اضافی و استفاده بهینه تر از منابع انرژی می‌شود.
- **بهبود مدیریت انرژی و کاهش هزینه‌ها:** اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات تولید، شبکه توزیع و مصرف‌کنندگان، امکان مدیریت دقیق‌تر انرژی را فراهم می‌کند. شرکت‌های برق می‌توانند با استفاده از اطلاعات لحظه‌ای، تولید و توزیع انرژی را بهتر برنامه‌ریزی کنند و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهند. همچنین مصرف‌کنندگان با دسترسی به اطلاعات دقیق‌تر درباره میزان مصرف خود، می‌توانند رفتار مصرفی خود را اصلاح کرده و هزینه‌های انرژی را کاهش دهند.

- پشتیبانی از انرژی های تجدیدپذیر: یکی از چالشهای اصلی انرژی های تجدیدپذیر، نوسان در میزان تولید آنها است. اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان پایش و کنترل لحظ های منابع انرژی مانند نیروگاه های خورشیدی و بادی، به مدیریت بهتر این منابع کمک میکند. این فناوری باعث میشود منابع انرژی پراکنده بهتر با شبکه هماهنگ شوند و امکان استفاده گسترده تر از انرژی های پاک فراهم شود.
 - افزایش مشارکت مصرف کنندگان: در شبکه های هوشمند، مصرف کننده تنها دریافت کننده انرژی نیست، بلکه می تواند در مدیریت شبکه نقش فعال داشته باشد. کنتورهای هوشمند و سامانه های مدیریت انرژی به کاربران امکان میدهند مصرف خود را مشاهده و کنترل کنند. این مشارکت میتواند باعث کاهش مصرف در ساعات اوج، افزایش بهره وری و ایجاد تعامل بهتر میان شرکت های برق و مشتریان شود.
- به طور کلی، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط هوشمند میان تجهیزات مختلف شبکه برق، موجب افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه ها، بهینه سازی مصرف انرژی و فراهم شدن زمینه توسعه انرژی های تجدیدپذیر میشود. به همین دلیل، IoT یکی از فناوری های اساسی در مسیر تبدیل شبکه های برق سنتی به شبکه های هوشمند آینده محسوب میشود.

۶. چالش ها و محدودیت های استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق

با وجود مزایای فراوان اینترنت اشیا در توسعه شبکه های هوشمند برق، پیاده سازی گسترده این فناوری با چالش ها و محدودیت هایی نیز همراه است. شبکه برق یکی از زیرساخت های حیاتی هر کشور محسوب میشود و اتصال تعداد زیادی تجهیزات هوشمند به آن، علاوه بر افزایش قابلیت ها، مسائل جدیدی مانند امنیت، مدیریت داده ها و هماهنگی بین فناوری های مختلف را ایجاد میکند.

۶-۱. امنیت و حریم خصوصی

یکی از مهمترین چالش های استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، مسئله امنیت سایبری است. افزایش تعداد تجهیزات متصل به شبکه، مسیرهای بیشتری برای حملات سایبری ایجاد میکند. تجهیزاتی مانند کنتورهای هوشمند، حسگرها و سامانه های کنترل از راه دور، در صورت ضعف امنیتی میتوانند هدف حملات قرار گیرند. حملات سایبری ممکن است باعث دستکاری اطلاعات مصرف، اختلال در عملکرد تجهیزات، افشای اطلاعات کاربران یا حتی ایجاد اختلال در عملکرد شبکه برق شوند. بنابراین استفاده از روش های رمزنگاری، احراز هویت تجهیزات، کنترل دسترسی و بهروزرسانی مداوم نرم افزارها برای افزایش امنیت ضروری است [6]. علاوه بر امنیت، حریم خصوصی مصرف کنندگان نیز اهمیت زیادی دارد. کنتورهای هوشمند اطلاعات دقیقی درباره الگوی مصرف کاربران جمع آوری میکنند و در صورت مدیریت نادرست این داده ها، ممکن است اطلاعات شخصی افراد در معرض سوءاستفاده قرار گیرد. بنابراین قوانین و سیاست های مناسب برای حفاظت از داده های کاربران باید در طراحی شبکه های هوشمند در نظر گرفته شود [6].

۶-۲. مدیریت حجم بالای داده ها

تجهیزات IoT در شبکه هوشمند برق حجم بسیار زیادی از داده ها را در زمان کوتاه تولید می کنند. مدیریت، ذخیره سازی و تحلیل این حجم از اطلاعات یکی از چالش های مهم این فناوری است. برای استفاده مؤثر از این داده ها، نیاز به فناوری هایی مانند رایانش ابری، پردازش لبه ای و الگوریتم های تحلیل داده وجود دارد. این فناوری ها کمک میکنند اطلاعات مهم سریع تر پردازش شده و تصمیم های مناسب در زمان کوتاه اتخاذ شوند [6].

۳-۶. استانداردها و ارتباطات

یکی دیگر از محدودیت های مهم در شبکه های هوشمند مبتنی بر IoT، وجود تجهیزات و فناوری های مختلف با استانداردهای متفاوت است. برای اینکه تجهیزات تولیدکنندگان مختلف بتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند، وجود استانداردهای مشترک ضروری است. نبود هماهنگی کافی میان پروتکل های ارتباطی می تواند باعث افزایش هزینه، کاهش سازگاری تجهیزات و دشواری در توسعه شبکه شود. همچنین شبکه ارتباطی باید دارای ویژگی هایی مانند تأخیر کم، قابلیت اطمینان بالا و امنیت مناسب باشد تا بتواند نیازهای شبکه برق را برآورده کند [6].

۴-۶. هزینه پیاده سازی و نگهداری

پیاده سازی شبکه هوشمند مبتنی بر IoT نیازمند سرمایه گذاری قابل توجه در زمینه تجهیزات، زیرساخت های ارتباطی، سامانه های پرورش و آموزش نیروی انسانی است. در برخی کشورها یا مناطق، هزینه اولیه بالا می تواند مانعی برای توسعه سریع این فناوری باشد. با این حال، در بلند مدت کاهش هزینه های بهره برداری، کاهش خاموشی ها و افزایش بهره وری انرژی می تواند هزینه های اولیه را جبران کند. اگرچه اینترنت اشیا نقش مهمی در هوشمندسازی شبکه برق دارد، اما موفقیت کامل آن نیازمند حل چالش هایی مانند امنیت سایبری، مدیریت داده، استانداردسازی ارتباطات و کاهش هزینه های پیاده سازی است. توجه به این مسائل باعث می شود شبکه های هوشمند آینده علاوه بر هوشمندی، از پایداری و امنیت کافی نیز برخوردار باشند [6].

۷. فناوری های آینده و مسیرهای توسعه اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق

با افزایش نیاز به انرژی، توسعه منابع تجدیدپذیر و پیچیده تر شدن شبکه های قدرت، نسل آینده شبکه های هوشمند برق به فناوری های پیشرفته تری نیاز خواهد داشت. اینترنت اشیا به عنوان یکی از پایه های اصلی Smart Grid، در سال های آینده با ترکیب شدن با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه های ارتباطی نسل جدید، رایانش لب های و دوقلوی دیجیتال، نقش گسترده تری در مدیریت سیستم های انرژی ایفا خواهد کرد.

۱-۷. نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

یکی از مهمترین مسیرهای توسعه شبکه های هوشمند، ترکیب اینترنت اشیا با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است. تجهیزات IoT حجم زیادی از داده های مربوط به تولید، انتقال و مصرف انرژی را تولید می کنند. تحلیل این داده ها با روش های سنتی دشوار است، اما الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند الگوهای پنهان را شناسایی کرده و تصمیم های هوشمندانه تری ارائه دهند. از کاربردهای هوش مصنوعی در شبکه هوشمند میتوان به پیش بینی بار مصرفی، تشخیص خطا، پیش بینی خرابی تجهیزات، بهینه سازی تولید انرژی و مدیریت منابع تجدیدپذیر اشاره کرد. ترکیب AI و IoT باعث میشود شبکه برق از یک سیستم صرفاً پایش کننده به یک سیستم تصمیم گیرنده و خودکار تبدیل شود [5].

۲-۷. استفاده از شبکه های ارتباطی نسل جدید مانند 5G

شبکه های ارتباطی یکی از بخشهای حیاتی در عملکرد اینترنت اشیا هستند. با افزایش تعداد تجهیزات متصل به شبکه برق، فناوری های ارتباطی قدیمی ممکن است پاسخگوی نیازهای آینده نباشند. فناوری 5G با ویژگی هایی مانند سرعت بالا، تأخیر کم و قابلیت اتصال تعداد زیادی دستگاه، می تواند نقش مهمی در توسعه شبکه های هوشمند ایفا کند. استفاده از 5G امکان ارتباط سریع تر میان

² Artificial Intelligence

² Machine Learning

تجهیزات مختلف شبکه، کنترل لحظه ای تجهیزات و اجرای برنامه های پیشرفته مانند مدیریت خودکار شبکه را فراهم میکند. این موضوع به خصوص در سیستم هایی که نیاز به واکنش سریع دارند، مانند تشخیص خطا و کنترل تجهیزات حیاتی، اهمیت زیادی دارد [5].

۷-۳. رایانش لبه ای

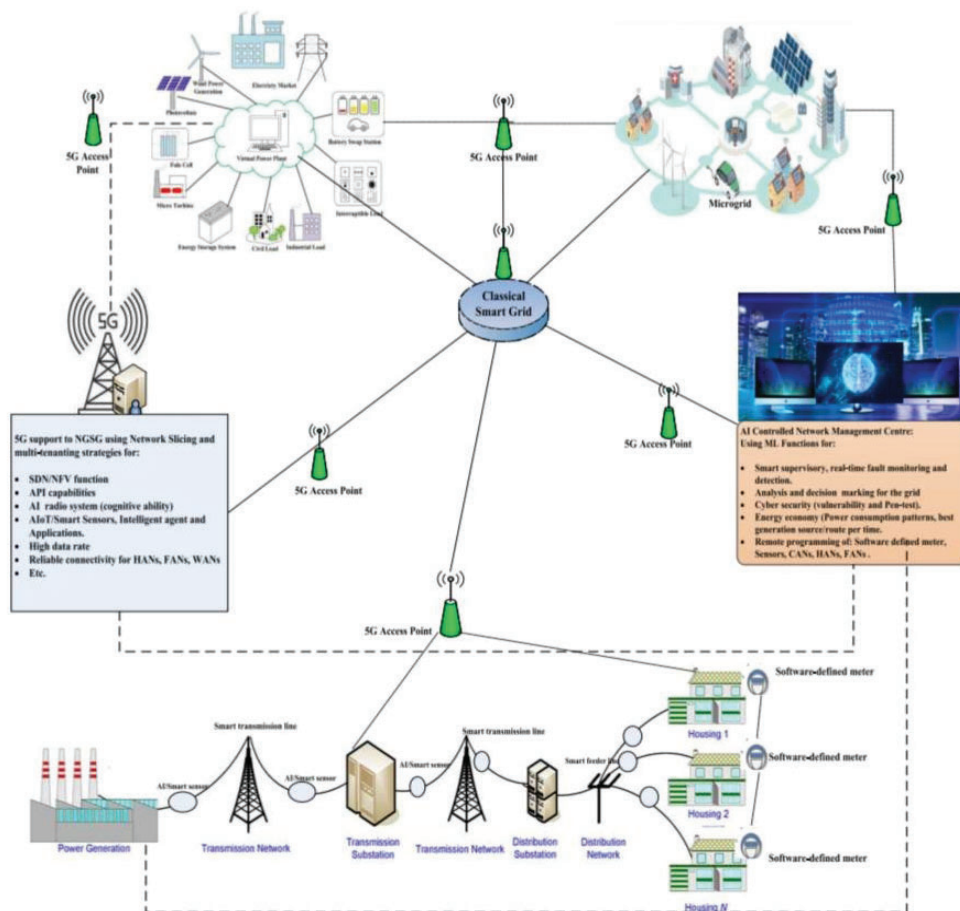
با افزایش تعداد تجهیزات IoT، ارسال تمام داده ها به مراکز پردازش ابری می تواند باعث افزایش تأخیر و مصرف پهنای باند شود. رایانش لبه ای راهکاری است که در آن بخشی از پردازش داده ها نزدیک به محل تولید اطلاعات انجام میشود. در شبکه هوشمند برق، Edge Computing میتواند داده های حسگرها و تجهیزات اندازه گیری را در نزدیک ترین نقطه پردازش کرده و امکان تصمیم گیری سریع تر را فراهم کند. این فناوری برای کاربردهایی مانند تشخیص سریع خطا، کنترل بلادرنگ تجهیزات و مدیریت شبکه توزیع اهمیت زیادی دارد.

۹-۴. دوقلوی دیجیتال^۲

یکی از فناوری های نوظهور در صنعت برق، استفاده از دوقلوی دیجیتال است. در این روش، یک مدل دیجیتالی از تجهیزات یا بخش های مختلف شبکه برق ایجاد میشود که با دریافت اطلاعات لحظه ای از تجهیزات واقعی، وضعیت آنها را شبیه سازی و تحلیل میکند. ترکیب Digital Twin با اینترنت اشیا می تواند به بهره برداران شبکه کمک کند تا عملکرد تجهیزات را بررسی کنند، مشکلات احتمالی را پیش بینی کنند و قبل از اجرای تغییرات واقعی، نتایج آن را در محیط مجازی ارزیابی نمایند.

آینده شبکه های هوشمند برق به سمت سیستم هایی حرکت میکند که علاوه بر پایش وضعیت، توانایی تحلیل، پیشبینی و تصمیم گیری خودکار دارند. ترکیب اینترنت اشیا با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، 5G، رایانش لبه ای و دوقلوی دیجیتال، زمینه ایجاد شبکه هایی پایدارتر، امن تر و کارآمدتر را فراهم خواهد کرد. معماری شبکه هوشمند نسل آینده مبتنی بر ترکیب فناوری های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و ارتباطات 5G در شکل ۴ نشان داده شده است.

² Digital Twin



شکل ۴. معماری شبکه هوشمند نسل آینده [5]

۱۰. نتایج و جمع بندی

شبکه های هوشمند برق به عنوان یکی از مهمترین راهکارها برای پاسخگویی به نیازهای آینده صنعت انرژی، نیازمند استفاده از فناوری های پیشرفته برای افزایش بهره وری، پایداری و قابلیت اطمینان هستند. در این میان، اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان ارتباط میان تجهیزات مختلف شبکه، نقش مهمی در تبدیل شبکه های برق سنتی به سیستم هایی هوشمند و داده محور ایفا میکند. در این مقاله، کاربردهای اصلی اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق بررسی شد. نتایج نشان می دهد که استفاده از تجهیزات متصل به شبکه مانند حسگرهای هوشمند، کنتورهای هوشمند و سامانه های مدیریت انرژی، امکان پایش لحظه ای وضعیت شبکه، مدیریت بهتر مصرف انرژی، تشخیص سریع خطاها و بهینه سازی عملکرد تجهیزات را فراهم میکند. همچنین IoT نقش مهمی در مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر و هماهنگ سازی تولید پراکنده با شبکه برق دارد.

با وجود مزایای فراوان، توسعه شبکه های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با چالش هایی مانند امنیت سایبری، حفظ حریم خصوصی، مدیریت حجم بالای داده ها، استانداردسازی ارتباطات و هزینه های اولیه پیاده سازی مواجه است. بنابراین، موفقیت این فناوری نیازمند طراحی معماری های امن، استفاده از پروتکل های ارتباطی مناسب و توسعه راهکارهای پیشرفته پردازش داده است. در آینده، ترکیب اینترنت اشیا با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه های 5G، رایانش لبه ای و دوقلوی دیجیتال، زمینه ایجاد شبکه های برق خودکارتر و هوشمندتر را فراهم خواهد کرد. این فناوری ها می توانند به پیشبینی بهتر مصرف، کاهش هزینه ها، افزایش استفاده از

انرژی های پاک و بهبود پایداری سیستم قدرت کمک کنند. در مجموع، اینترنت اشیا یکی از فناوری های کلیدی در مسیر تحول صنعت برق محسوب میشود و استفاده صحیح از آن می تواند نقش مهمی در ایجاد شبکه های انرژی کارآمد، پایدار و پاسخگو به نیازهای آینده داشته باشد.

مراجع

- [1] Ghasempour, A., "Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges," *Inventions*, vol. 4, no. 1, p. 22, 2019, doi: 10.3390/inventions4010022.
- [2] Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., and Blaabjerg, F., "Internet of Things Applications as Energy Internet in Smart Grids and Smart Environments," *Electronics*, vol. 8, no. 9, p. 972, 2019, doi: 10.3390/electronics8090972.
- [3] Y. Saleem et al., "Internet of things-aided smart grid: Technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62962–63003, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984.
- [4] Jia, L., Li, Z., and Hu, Z., "Applications of the Internet of Things in Renewable Power Systems: A Survey," *Energies*, vol. 17, no. 16, p. 4160, 2024, doi: 10.3390/en17164160.
- [5] Esenogho, E., Djouani, K., and Kurien, A. M., "Integrating artificial intelligence Internet of Things and 5G for next-generation smartgrid: A survey of trends challenges and prospect," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4794–4818, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140595.
- [6] C. Matta et al., "A survey on IoT-based smart electrical systems: An analysis of standards, security, and applications," *Energies*, vol. 19, p. 965, 2026, doi: 10.3390/en19040965.
- [7] Mehdi Aref Khiabani, "Smart grid: Technologies, pros. and con"s., *Quarterly journal of Electrical and computer Engineering-Kahroba*, NO. 46, 2024.
- [8] S. Zarifi, S. Khazraei Shoulafar, "Artificial Intelligence: An Effective Approach for Monitoring and Predictive Maintenance in Power Distribution Systems", *Quarterly journal of Electrical and computer Engineering-Kahroba*, NO. 51, 2026.