

A Review of Recent Advances in Smart Energy Systems and Their Management in a Smart Grid Environment

Hossein Hajian *

Assistant Professor, Department of Power Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Bostanabad Branch, East Azerbaijan, Iran.

Abstract

For automated and distributed electricity generation in a Smart Grid (SG), which is essentially considered a future power network, a bidirectional flow of electricity and information is utilized. In fact, SG enables the creation of a transmission network, integration of energy resources, real-time asset monitoring, power quality improvement, enhanced stability and reliability, and bidirectional information sharing. Additionally, SG offers numerous benefits such as demand response, distribution automation, optimal electricity utilization, economic energy consumption, real-time network status monitoring, voltage regulation or VAR control, and power storage.

This study examines smart grid enabling technologies up to 2022, as well as the following factors:

1. Key features and challenges of the smart grid,
2. Regulations and standard systems for the smart grid,
3. Smart grid energy subsystems, and
4. Smart grid management and protection systems for future research projects.

In the conclusion section, research challenges and future recommendations for emerging patterns are discussed.

Keywords: smart grid, bidirectional communication, controllers, distributed energy resources, monitoring and measurement, security, vendors, energy storage, protection system

Received: 21/December/2024

Accepted: 18/February/2025

eISSN: 3060-6144

ISSN: 2980-8936

مروری بر پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های انرژی هوشمند و مدیریت آن‌ها در یک محیط شبکه هوشمند

استادیار، گروه برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد
بستان‌آباد، آذربایجان شرقی، ایران.

حسین حاجیان *

چکیده

برای تولید برق خودکار و توزیع شده در یک شبکه هوشمند (SG) که در واقع نوعی شبکه برق آتی تلقی می‌شود، از جریان برق و اطلاعات دوطرفه استفاده می‌شود. در حقیقت، می‌توان این گونه عنوان نمود که SG با ایجاد یک شبکه انتقال، منابع انرژی، نظارت بر دارایی‌ها در زمان واقعی، افزایش کیفیت توان، افزایش پایداری و قابلیت اطمینان و اشتراک گذاری اطلاعات دوطرفه را امکان‌پذیر می‌کند. همچنین، SG مزایای بی‌شماری نظیر پاسخ به تقاضا، اتوماسیون توزیع، استفاده بهینه از برق، انرژی اقتصادی، نظارت بر وضعیت شبکه بلادرنگ، تنظیم ولتاژ یا کنترل VAR و ذخیره‌سازی برق را نیز محقق می‌سازد. در پژوهش حاضر، فناوری‌های فعال‌کننده شبکه هوشمند تا سال ۲۰۲۲ و همچنین، عوامل زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد: (۱) ویژگی‌ها و چالش‌های برجسته شبکه هوشمند؛ (۲) قوانین و سیستم استاندارد شبکه هوشمند؛ (۳) زیرسیستم انرژی شبکه هوشمند و (۴) سیستم مدیریت شبکه هوشمند و سیستم حفاظتی برای پروژه‌های آتی محققان جدید. در بخش نتیجه‌گیری، چالش‌های تحقیق و توصیه‌های آتی الگوهای جدید، مطرح می‌شود.

کلیدواژه‌ها: شبکه هوشمند، ارتباط دوطرفه، کنترل‌کننده‌ها، منابع انرژی پراکنده، نظارت و اندازه‌گیری، امنیت، فروشنده، ذخیره انرژی، سیستم حفاظتی

۱- مقدمه

شبکه برق، شبکه‌ای است که به تولید، انتقال، توزیع و کنترل توان الکتریکی می‌پردازد. به‌طور معمول، شبکه برق سنتی متشکل از یک سیستم تولید مرکزی، کنترل محدود بر فرکانس و ولتاژ، یک کنترل مرکزی، نظارت بر وضعیت شبکه محدود و یک سیستم توزیع دستی با عدم وجود بار هوشمند است. به عبارتی، می‌توان این‌گونه عنوان نمود که شبکه هوشمند (SG)، شکل توسعه‌یافته یا هوشمندی از شبکه معمولی و متشکل از یک جریان دوطرفه اطلاعات و برق بوده و درواقع، نوعی سیستم تأمین انرژی خودکار و بسیار پیشرفته را ایجاد می‌کند [۱].

در حقیقت، یک SG، انرژی را با راندمان و بهره‌وری بیشتر ارائه کرده، تعامل مفید مشتری را تسهیل نموده و کنترل ولتاژ فراگیر، کنترل فرکانس قابل اعتماد، تکنیک‌های مدیریت نوین را امکان‌پذیر کرده و به رویدادهای متعددی که در سیستم روی می‌دهد، پاسخ می‌دهد [۲]. به‌طور مثال، در هنگام بروز نقص در یک فیدر توزیع یا ترانسفورماتور، SG به‌طور خودکار از طریق قابلیت خودترمیمی، پخش بار را بازیابی می‌کند [۳-۶]. به همین نحو، شبکه به‌طور خودکار به اضافه‌بار یا تزریق ژنراتور توزیع‌شده پاسخ می‌دهد [۷]. به‌علاوه، در زمینه کنتورهای هوشمند نیز این بارگذاری به کاهش پیک تقاضا در سیستم قدرت و قبوض برق منجر می‌شود [۸]. درواقع، می‌توان این‌گونه عنوان نمود که کاهش بار به ایجاد زنجیره‌ای از مزایا نظیر کاهش تلفات انرژی، هموارسازی بار در شبکه و کاهش سرمایه‌گذاری در سیستم منجر می‌شود [۹-۱۱].

طبق بررسی‌های صورت گرفته، SG متشکل از یک شبکه تولید، انتقال و توزیع انرژی بوده و از نقش مبادله دوطرفه برق و اطلاعات برخوردار است. همچنین، توسط فناوری‌های ارتباطی امن مورد پشتیبانی قرار گرفته و از کنترل مؤثر بر مشتریان، تأسیسات و محیط‌زیست دوستانه‌تر برخوردار است [۱۲-۱۴] و توصیف ارائه‌شده، تقریباً تمام جنبه‌های SG را شامل می‌شود [۱۵]. لازم به ذکر است که شبکه معمولی را می‌توان به SG تغییر داده و با در نظر گرفتن محدودیت‌های سرمایه‌گذاری و نیازهای مصرف‌کننده و ابزار، سطح هوشمندی را تا حدی محدود نمود. در حقیقت، می‌توان این‌گونه عنوان نمود که SG ترکیب یا ادغام زیرساخت‌های انرژی، فناوری‌های ارتباطی، عملکردها و خدمات با کنترل مؤثر است [۱۹]. در پژوهش حاضر، موارد زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

A- ویژگی‌های اصلی شبکه هوشمند، ویژگی‌ها و چالش‌های اصلی و توصیف برخی از سیستم‌های استاندارد SG

B- توصیف سیستم زیرساخت هوشمند، تولید برق پیشرفته، ذخیره انرژی، انتقال، توزیع و کاربردپذیری

C- سیستم حفاظت هوشمند، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، محافظت در برابر خرابی تجهیزات، امنیت و حریم خصوصی مشتری و اطلاعات مربوط به شبکه

در گذشته، بررسی‌های متعددی در خصوص SGها با بحث در رابطه با مفاهیم اساسی و فناوری‌های به‌کاررفته در SG صورت گرفته است. نویسندگان در یک سری مقالات [۲۰-۲۵] به بررسی استانداردهای SG موجود پرداخته و توصیه‌های مستدلی را در رابطه با استانداردهای SG نسل بعدی عنوان کرده‌اند. همچنین نویسنده در یک مقاله [۲۶] مزایای کنتورهای هوشمند را مطرح نموده و خلاصه‌ای از چارچوب قضایی مربوط به اهداف و خط‌مشی‌های اندازه‌گیری هوشمند را ذکر می‌کند. در مقاله دیگر [۲۷]، نویسندگان به بحث در خصوص جنبه‌های صنعتی یک شبکه توزیع هوشمند پرداخته و گزینه‌های فناوری احتمالی مورد استفاده در SGهای آتی را نیز مطرح نموده‌اند. در پژوهش دیگری نیز در زمینه خودروهای برقی (EV)، موضوعات مرتبط نظیر سیستم‌های انفورماتیک صنعتی شامل (۱) مدیریت هوشمند انرژی الکتریکی؛ (۲) زیرساخت شارژ و باتری‌های خودروی برقی هیبریدی پلاگین / خودروی برقی پلاگین؛ (۳) الزامات انتقال اطلاعات و (۴) اتصال خودرو به شبکه (V2G) مورد بحث قرار گرفته است. همچنین، شایان ذکر

است که SG از برق‌رسانی سایر بخش‌ها نیز پشتیبانی می‌کند. نویسندگان در مقاله‌ای [۲۹] برق‌رسانی بخش حمل‌ونقل در محیط SG را مورد بررسی قرار می‌دهند. در ضمن، نظرسنجی‌هایی در مقاله دیگر [۳۰] با هدف یافتن یک تعریف جامع از سیستم توزیع هوشمند ارائه شده است.

برخی از پژوهش‌ها بر فعالیت‌های مختلف تحقیق و توسعه مرتبط با SG متمرکز شده‌اند. اویتیان و همکاران [۳۱] به شرح فعالیت‌های مربوط به توسعه SG در نروژ پرداخته و داده‌هایی را ارائه داده‌اند که می‌تواند در پیشبرد کار تحقیقاتی مؤثر باشد. در دو مقاله [۳۲، ۳۳]، نویسندگان پروژه‌های SG را از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار داده و اقدامات صورت گرفته توسط گروه‌های علمی در اروپا در زمینه پیاده‌سازی این زیرساخت را مورد تحلیل قرار می‌دهند. آمارهای به‌دست‌آمده حاکی از آن است که امروزه، راهکارهای متعددی در این خصوص وجود دارد. به‌علاوه در یک مقاله [۳۴]، نویسندگان طرح‌های مدیریتی مختلف را مورد آزمایش قرار داده‌اند. طبق شواهد به‌دست‌آمده، استانداردهای زیادی در زمینه انتقال اطلاعات و پروتکل‌ها وجود دارد؛ اما تعداد اندکی از آن‌ها "شبکه‌های انرژی پذیرفته‌شده" هستند. در مقاله دیگر [۳۵]، حساسیت امنیتی و اقدامات متقابل در زمینه سیستم اطلاعات شبکه انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. یکی دیگر از حوزه‌های مورد بررسی، فناوری سیستم اندازه‌گیری منطقه وسیع (WAMS) و واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) است.

امروزه، شبکه‌های مش بی‌سیم، بیشتر سهم بازار تأسیسات شبکه SG موجود را به خود اختصاص داده‌اند. در یک مقاله [۳۶]، نویسندگان با توجه انتخاب شبکه مش بی‌سیم (WMN) در مقابل هر فناوری ارتباطی دیگر به بحث در رابطه با کمی‌سازی محدودیت‌های پهنای باند/تأخیر/کیفیت خدمات در زمینه SG‌ها می‌پردازند. هدف از پژوهش حاضر، بحث در خصوص برخی از تکنیک‌های بهینه‌سازی ارائه‌شده در مقالات به‌منظور رفع برخی از چالش‌های مربوط به استقرار WMN در SG‌ها است. همچنین در پژوهش حاضر، رادیوشناختی به‌عنوان یک تکنیک بهینه‌سازی در سطح فیزیکی و نیز امکان استفاده از شبکه‌های تعریف‌شده نرم‌افزار بی‌سیم (WSDN) جهت بهبود چشم‌انداز کلی و مدیریت WMN‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. وانگ و همکاران [۳۸] بررسی‌هایی را در خصوص تزریق داده‌های محرب و اقدامات متقابل آن‌ها انجام داده‌اند. در یک مطالعه [۳۹]، اثرات یک مزرعه انرژی بادی متصل به SG با ارائه مدل مزرعه بادی، عملکرد عملیاتی، پیش‌بینی خروجی مزرعه بادی، جریان توان، تعادل ولتاژ و توان راکتیو، پایداری حالت پایدار، پایداری سیگنال، خرابی و قابلیت اطمینان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که SG تنها بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از ارتباطات 5G، از جمله توان عملیاتی بسیار بالا و تأخیر بسیار کم، قابل تحقق است. در مقاله دیگر [۲۱]، مطالعه جامعی در خصوص مصرف انرژی در زمان واقعی، حریم خصوصی و امنیت صورت گرفته است. نظرسنجی در یک مطالعه [۴۰] بر فناوری‌های ارتباطی مربوط به یک شبکه توزیع ولتاژ پایین متمرکز است. همچنین، سه فناوری حامل خط برق، شبکه مش بی‌سیم و فرکانس رادیویی مورد بحث قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بین نرخ بیت، برد و هزینه، دو مورد اول از بهترین تطابق برخوردار هستند. دوفور و همکاران [۴۱] به بحث در خصوص تحقیق و توسعه SG و جنبه‌هایی نظیر نفوذ انرژی تجدیدپذیر در SG، ریزشبکه‌ها، سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده، برنامه‌ریزی بار، تعادل توان، چالش‌های انتقال اطلاعات، رفتار، کنترل توزیع انرژی و حفاظت از خطا پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی بلادرنگ، راهکارهایی برای رفع چالش‌های موجود ارائه شده است. شایان ذکر است که پژوهش حاضر، مقالات تا سال ۲۰۲۲ را در رابطه با موارد فوق‌الذکر مورد بررسی قرار می‌دهد.

پژوهش حاضر به شرح زیر بخش‌بندی شده است. در بخش ۲، ویژگی‌های بارز SG و در بخش ۳، قوانین، استانداردها و برنامه‌ها ارائه شده است. بخش ۴ به بحث در خصوص سیستم انرژی هوشمند، تولید، ذخیره‌سازی، انتقال،

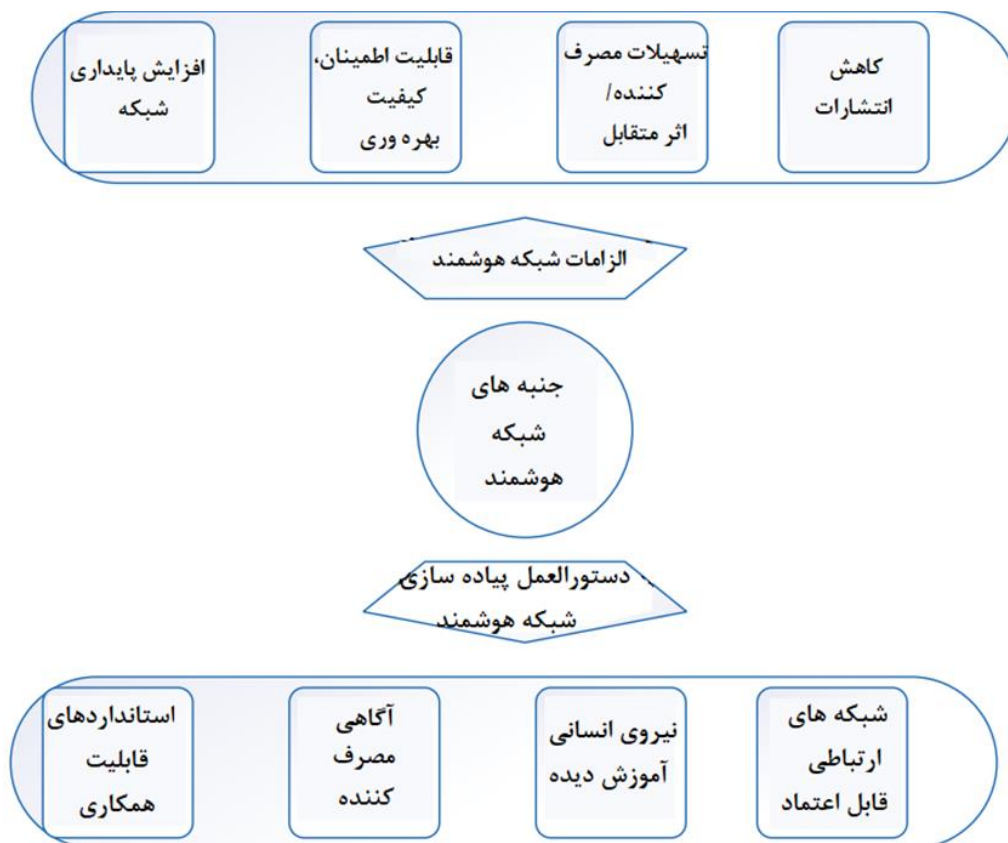
توزیع و کاربردپذیری می‌پردازد. بخش ۵ به بحث در خصوص سیستم مدیریت هوشمند و بخش ۶ به شرح سیستم حفاظت هوشمند می‌پردازد. بخش ۷ با ارائه بحث‌های مختصر به نتیجه‌گیری پژوهش می‌پردازد.

۲- ویژگی‌های پیشرفته شبکه هوشمند

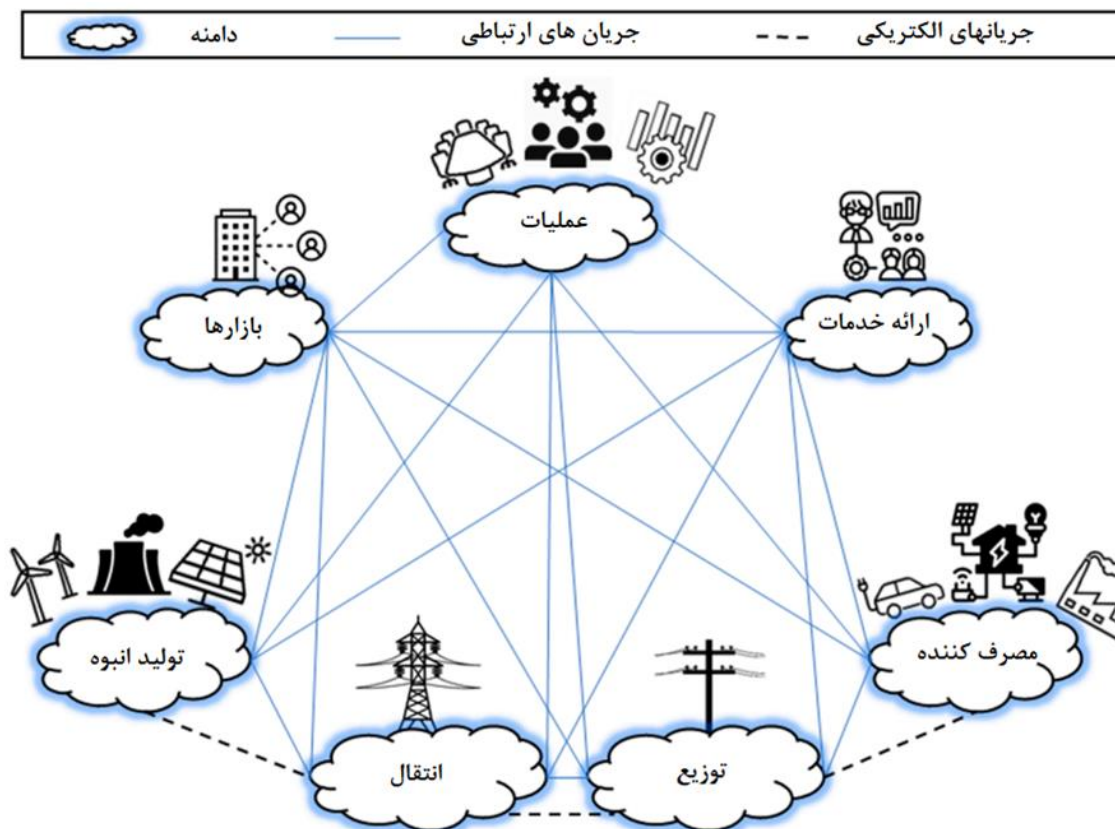
از آنجاکه با گذر زمان، تقاضاها و انتظارات ذینفعان با افزایش همراه است، از این‌رو خواسته‌ها و الزامات جدید باعث شده است که صنعت و دولت به نوسازی شبکه روی آورند. به عبارتی، می‌توان این‌گونه عنوان نمود که نوسازی، فرصت‌های جدیدی را برای مشاغل حرفه‌ای، فعالیت‌های تحقیق و توسعه در زمینه انتقال تولید انرژی، توزیع، اتوماسیون، الکترونیک، تولید باتری، امنیت سایبری، حریم خصوصی و فناوری‌های ارتباطی و غیره ایفا می‌کند. شایان ذکر است که با وجود آنکه SGها فرصت‌های تجاری را گشوده‌اند؛ اما هنوز تعریف دقیق و جامعی از SG ارائه نشده است. مؤسسه ملی استانداردها و فناوری‌ها (NIST)، مزایا و همچنین الزامات SGها را ارائه نموده که در شکل ۱ نمایش داده شده است. در جدول ۱، تمایزات بین SGهای معمولی و در شکل ۲، مدل SG NIST ارائه شده است. برای درک بهتر شبکه پیشرفته، NIST مدلی (شکل ۲) را ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان مرجع مورد استفاده قرار گیرد. طبق این مدل، SG به هفت حوزه (دامنه) که هر یک شامل یک یا چند عامل SG، سیستم، تجهیزات یا برنامه است، تفکیک می‌شود [۴۴]. در جدول ۲، شرح مختصری در رابطه با دامنه‌ها و عوامل مربوطه ارائه شده است. برای بحث دقیق‌تر، به [۴۵] مراجعه شود. طبق بررسی‌های صورت گرفته، SG به برخی از سیستم‌های اصلی نظیر سیستم‌های زیرساخت هوشمند، مدیریت هوشمند و سیستم‌های حفاظت هوشمند طبقه‌بندی می‌شود.

A. سیستم زیرساخت هوشمند: این سیستم بخش‌هایی نظیر تولید، انتقال، اندازه‌گیری اطلاعات، نظارت و زیرساخت‌های ارتباطی را شامل می‌شود. SG دارای جریان دوطرفه برق و اطلاعات است. همچنین، منابع انرژی توزیع شده (DES) به افزایش کارایی و بهره‌وری شبکه برق منجر می‌شود. DES با مقیاس کوچک (نظیر یک پنل خورشیدی روی پشت‌بام)، مصرف‌کننده را تغذیه کرده و انرژی باقی‌مانده را مجدداً به شبکه برق بازمی‌گرداند [۴۶]. در حقیقت، این امر زمانی روی می‌دهد که DES در حالت تزویج با شبکه ماکرو اجرا شده و مفهوم «ریزشبکه» را ایجاد می‌کند. در ضمن، DES می‌تواند به یک بار معین در حالت «جزیره» انرژی را مبادله کند؛ اما نمی‌تواند انرژی را با ماکروشبکه به‌صورت عمده یا در هنگام خطا مبادله کند. لازم به ذکر است که جریان دوسویه اطلاعات از مصرف‌کنندگان به شرکت و از ابزار به مصرف‌کنندگان به تبادل اطلاعات مفید، ارائه نظارت از راه دور بر وضعیت مصرف‌کننده، قطع، وصل مجدد و شکل‌دهی نمایه تقاضا منجر می‌شود. این بررسی، یک سیستم زیرساخت هوشمند را به چندین زیرسیستم طبقه‌بندی می‌کند:

- زیرسیستم انرژی هوشمند راه‌اندازی مدرن از یک مولد انرژی هوشمند، انتقال هوشمند و رسانه توزیع هوشمند و کاربردپذیری را امکان‌پذیر می‌کند.
- زیرسیستم اطلاعات هوشمند، اطلاعات یا اندازه‌گیری داده‌ها، نظارت و راهکارهای لازم برای مدیریت آن را امکان‌پذیر می‌کند.
- زیرسیستم ارتباط هوشمند، یک رسانه انتقال اطلاعات را ایجاد می‌کند.



شکل ۱. الزامات و نقشه راه یک سیستم شبکه هوشمند



شکل ۲. مدل NIST در رابطه با SG

جدول ۱. مقایسه بین شبکه‌های معمولی و هوشمند

شبکه موجود	شبکه هوشمند
الکترومکانیکی	دیجیتال
ارتباط جهت‌دار	ارتباط دوطرفه
تولید اصلی	تولید پراکنده
تعداد کمی از حسگرها	تعداد زیادی از حسگرها
نظارت دستی	نظارت خودکار
ترمیم دستی	خودترمیمی
خرابی/نقص و خاموشی	جزیره‌ای بسیار سازگار و هوشمند
کنترل محدود	کنترل فراگیر
تعداد کمی از گزینه‌های مصرف‌کننده	تعداد زیادی از گزینه‌های مصرف‌کننده

جدول ۲. دامنه‌ها و عوامل در مدل NIST SG

دامنه/ حوزه	عاملان/ شرکت‌کنندگان در دامنه
مشتری/ مصرف‌کننده	بار
بازارها	اپراتور سیستم و شرکت‌کنندگان
ارائه‌دهندگان خدمات	ارائه خدمات مختلف به مصرف‌کنندگان و ابزار
عملیات	مدیران انتقال/توزیع
تولید انبوه	مولدهای برق به صورت عمده
انتقال	حامل مقادیر زیادی انرژی الکتریکی در فواصل طولانی
توزیع	توزیع‌کنندگان نیروی برق به/از مصرف‌کنندگان

در مطالعه حاضر، زیرسیستم‌های اطلاعات و ارتباطات برای پرداختن به پیچیدگی ساختاری و عملیاتی SG به عنوان سیستمی از سیستم‌ها تفکیک شده است. این امر موجب می‌شود بررسی ما از فناوری‌های SG با IEEE P2030 برای برآوردن الزاماتی نظیر قابلیت همکاری از تطابق لازم برخوردار باشد. بخش ۳ به تشریح IEEE P2030 می‌پردازد.

B. سیستم مدیریت هوشمند: این سیستم، خدمات و عملکردهای مدیریتی را ارائه می‌دهد. همچنین، اهداف مدیریتی مربوط به افزایش بهره‌وری انرژی، برابری عرضه و تقاضا، کاهش انتشار CO و کاهش هزینه‌های عملیاتی هستند.

C. سیستم حفاظت هوشمند. این سیستم، قابلیت اطمینان شبکه، تحلیل پایداری، محافظت در برابر خرابی سیستم، امنیت و حریم خصوصی شبکه انرژی و داده را امکان‌پذیر می‌کند.

۳- استانداردها، قوانین و پروژه‌های شبکه هوشمند

وزارت انرژی ایالات متحده (DOE) به دفعات یک کارگاه آموزشی ارتباطات و کنترل در زمینه نفوذ DER در سیستم قدرت در سال ۲۰۰۱ را راه‌اندازی کرده است [۴۹]. شایان ذکر است که در کارگاه DOE جنبه‌های مختلف تبدیل، از متعارف تا SG به نحو گسترده‌ای مورد بحث قرار گرفته است [۵۰]. همچنین، دولت فدرال ایالات متحده، خط‌مشی‌های مرتبط با SG را تدوین کرده و در قوانین کنگره تحت عنوان قانون فردی و امنیت در سال ۲۰۰۷ و قانون بازیابی و سرمایه‌گذاری مجدد آمریکا در سال ۲۰۰۹ تشریح شده است. همچنین، استاندارد بین‌المللی IEC 61850، مدل اتوماسیون شبکه‌های الکتریکی را تشریح کرده و رویکردی مطابق با استانداردها را که بهینه‌سازی قابلیت کنترل SG در سطح میدانی امکان‌پذیر می‌کند، به نحو مؤثری ارائه می‌دهد. برخی از آخرین استانداردهای IEEE عبارت‌اند از استاندارد IEEE PC37.240 در رابطه با الزامات امنیت سایبری برای سیستم‌های اتوماسیون، حفاظت و

کنترل پست، استاندارد IEEE P2030.5 (بازنگری) در رابطه با پروتکل کاربرد نمایه انرژی هوشمند [۵۱، ۵۲]. لو و همکاران مسائل مربوط به معماری مرتبط با ارتباطات اطلاعاتی را در SG مورد مطالعه قرار داده و خطر نشان کردند که استانداردهای ETSI M2M از قابلیت رفع چنین مسائلی برخوردار هستند [۵۳]. شایان ذکر است که یک رویکرد سرویس گرا و برنامه گرا نظیر استاندارد ETSI M2M، از قابلیت همکاری دستگاه و مقیاس پذیری سیستم SG پشتیبانی می‌کند. به علاوه، استانداردهای ETSI M2M، باعث تسهیل مدیریت دستگاه، پاسخ به تقاضا و اجرای کارآمد امنیت اطلاعات می‌شوند [۵۴]. نویسندگان در [۵۵] استانداردهای جدیدی را در خصوص ادغام پیشرفته SG و رایانه سازی بر اساس خدمات معنایی ارائه می‌دهند. معماری IEC 61850 و OPC (OPC UA) چارچوب یکپارچه سازی خدمات محور ارزش افزوده را در زمینه SG ارائه می‌دهد.

برای اجرای عملی، دستورالعمل SG (به عنوان مثال، انگلستان [۵۶]، اتریش [۵۷] و اسپانیا [۵۸]) پیروی می‌شود. در ضمن، دستورالعمل/برنامه همکاری بین کشورهای مختلف، برای توسعه استانداردهای جدید و ارتقای استانداردهای موجود در سطح بین المللی مورد نیاز است [۵۹]. این بررسی، استانداردهای IEEE نظیر IEEE P2030 را مورد بحث قرار می‌دهد. در IEEE P203، دستورالعمل‌ها و رویکردهای ارتباطات اطلاعاتی و قابلیت همکاری سیستم الکتریکی ارائه شده است. شایان ذکر است که قابلیت همکاری دستگاه‌ها، برقراری ارتباط مؤثر با یکدیگر و انتقال داده‌های معنادار را برای سازمان‌ها امکان پذیر می‌کند. همچنین، P2030، SG را به عنوان سیستمی از سیستم‌ها، یعنی یک سیستم پیچیده [۶۱] در نظر می‌گیرد. در سال‌های اخیر، دولت‌ها، صنایع و دانشگاه‌ها مبالغ هنگفتی را برای تحقیقات دانشگاهی، برنامه‌های آزمایشی و آزمایش‌های میدانی صرف کرده‌اند. این پروژه‌ها زیرساخت‌های اندازه گیری پیشرفته (AMI)، شبکه‌های انتقال و توزیع برق، کنتورهای هوشمند، نیروگاه‌های مجازی (VPP)، منابع انرژی توزیع شده، برنامه‌های کاربردی خانگی، ریزشبکه‌ها و خودروهای برقی را شامل می‌شوند. در یک مطالعه [۶۲]، نویسندگان در این خصوص که اکثر کشورها، بخش قابل توجهی از سرمایه گذاری را به پروژه‌ها اختصاص می‌دهند، به بحث پرداخته‌اند. SG‌ها فرصت‌های تحقیقاتی و شغلی بسیاری را در نقاط مختلف جهان گشوده‌اند و با توجه به اینکه SG یک سیستم پیچیده و نشانگر ادغام ضعیف انرژی، الکترونیک، نرم افزار و فناوری‌های ارتباطی است، از این رو فرصت‌های تحقیقاتی بین فناوری نیز وجود دارد.

۴- زیرسیستم انرژی هوشمند

برخلاف شبکه معمولی، SG دارای اطلاعات دو جهت و جریان برق است. به علاوه، سیستم زیرساخت هوشمند متشکل از یک زیرسیستم انرژی هوشمند، یک زیرسیستم ارتباطی هوشمند و یک زیرسیستم اطلاعات هوشمند بوده و شبکه برق معمولی همواره یک طرفه بوده است.

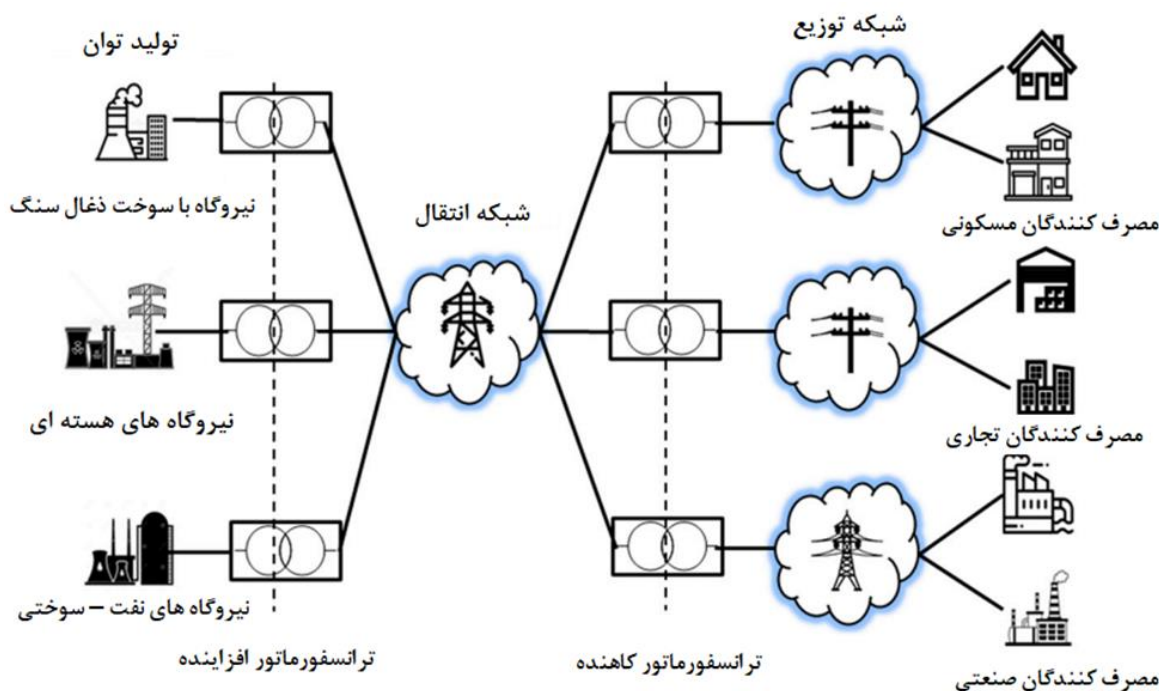
از دیرباز، سیستم الکتریکی از نقش محوری برخوردار بوده است. توان تولید شده توسط ژنراتورهای آبی و حرارتی از ۱۱٫۵ کیلوولت به ۱۰۰۰/۷۰۰/۵۰۰/۲۲۰ کیلوولت افزایش یافته و در حوضچه برق مرکزی با ولتاژ نهایت بالا (EHV) (شبکه انتقال اولیه) تزریق می‌شود. برق در این محیط EHV به فواصل طولانی جریان دارد. برق وارد ایستگاه شبکه انتقال ثانویه شده، در آنجا به سطح ۶۶/۱۳۲/۱۳۸ کیلوولت کاهش یافته و به یک شبکه انتقال ثانویه (شبکه) تزریق می‌شود. خطوط انتقال ثانویه فشار قوی، پست‌های توزیع و ولتاژ اولیه را تغذیه می‌کنند که ولتاژ را از ۱۳۲ کیلوولت و ۶۶ کیلوولت به ۱۱٫۵ کیلوولت کاهش می‌دهد. در این نقطه، ولتاژ از شبکه انتقال خارج شده و به شبکه توزیع وارد می‌شود. شبکه توزیع شامل شبکه‌های ۱۱٫۵ کیلوولت تحت عنوان شبکه توزیع اولیه است که به ترانسفورماتور پدمانند پست توزیع ثانویه (SDS) ختم می‌شود. شبکه توزیع ثانویه از SDS سرچشمه گرفته و ولتاژ ۴۴۰ ولت، سه فاز، چهار

سیم و اتصال ستاره‌ای را حمل می‌کند. در شکل ۳، یک شبکه برق سنتی نشان داده شده است. سیستم برق مرکزی در معرض مشکلات زیادی قرار دارد و در صورت وقوع هر نوع ناپایداری نظیر ناپایداری زاویه، فرکانس یا ولتاژ می‌تواند تمامی قسمت‌های سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار داده و به خاموشی سراسری منجر شود. همچنین، شبکه انتقال یک گلوگاه در مسیر تولید متمرکز است که به بارگذاری بیش از حد رسانه‌های انتقال، تلفات انرژی و کاهش عملکرد منجر می‌شود.

برخلاف شبکه سنتی، تولید بادی، خورشیدی، دیزل، نفت کوره و باقیمانده نفت کوره را می‌توان بسته به اندازه آن به شبکه توزیع ولتاژ اولیه و ثانویه تزریق کرد. مصرف‌کننده، برق را تولید کرده، آن را مصرف نموده و نیروی اضافی را در شبکه برق کلان تغذیه می‌کند و مفهوم تولیدکننده-مصرف‌کننده را به وجود می‌آورد. در شکل ۴، نواحی زیرسیستم انرژی هوشمند نشان داده شده است.

۴-۱- سیستم تولید برق هوشمند

در حقیقت می‌توان این گونه عنوان نمود که سیستم تولید برق هوشمند، متشکل از منابع برق معمولی است که با فناوری‌های ارتباطی دیجیتال ادغام شده است. انرژی‌های باد و خورشید منابع انرژی تجدیدپذیر برق (RER) به شمار می‌آیند. در یک مطالعه [۶۴]، تولید برق از RERها برای برزیل، OECD و سایر نقاط جهان تشریح شده است. سوخت‌های فسیلی جو را آلوده کرده، تحلیل رفته و قیمت آن‌ها با گذشت زمان افزایش می‌یابد. از آنجاکه هزینه‌های جاری سوخت‌های فسیلی بسیار بالاست، زغال‌سنگ تنها گزینه‌ای است که در تولید برق نسبتاً ارزان‌تر است. منابع برق آبی نیز با مشکلاتی همراه هستند. ساخت سدهای مخزنی بزرگ مستلزم زمان و هزینه زیادی است. چنین پروژه‌هایی، پیامدهای زیست‌محیطی به صورت باتلاقی شدن در پی داشته و زمین‌های اطراف را به زمین بایر تبدیل می‌کنند. پروژه‌های روان آب مستلزم هزینه، سرمایه و زمان ساخت و ساز قابل ملاحظه‌ای نیستند [۶۵].



شکل ۳. شبکه انرژی سنتی



شکل ۴. زیرسیستم انرژی هوشمند

نیروگاه‌های بخار زغال‌سنگ و پروژه‌های کوچک رودخانه‌ای، دو نوع منبع انرژی بوده که مستلزم زمان ساخت، سرمایه و هزینه‌های عملیاتی کمتری هستند. کشورهای در حال توسعه که با کمبود شدید برق مواجه هستند و قیمت هر واحد همواره در حال افزایش است، می‌توانند به عنوان یک راهکار ممکن کوتاه‌مدت با قیمت پایین از این استراتژی استفاده کنند [۶۶]. با وجود این، متأسفانه بخش برق توسط یک مافیای تولید برق تحت کنترل تولیدکنندگان مستقل برق (IPP) تصاحب شده است و از این رو، مانع برداشتن گام‌هایی در جهت تولید برق با هزینه پایین‌تر می‌شوند [۶۷]. مطابق بررسی‌های صورت گرفته، برای بقای بخش برق در کشورهای در حال توسعه بایستی وابستگی آن به IPP‌های تولیدکننده انرژی حرارتی کاهش یابد. در ضمن، بایستی پروژه‌های کوچک مبتنی بر آب و زغال‌سنگ در کوتاه‌مدت و سدهای مخزنی در مقیاس بزرگ در بلندمدت با نفوذ بیشتر RERها انتخاب شود.

۴-۲- سیستم ذخیره‌سازی هوشمند

در محیط SG، RERها وابستگی به منابع تولید معمولی را کاهش می‌دهند؛ اما با تغییر و نوسان بالایی همراه هستند. ماهیت غیرقابل پیش‌بینی RERها حتی می‌تواند ثبات شبکه را به مخاطره اندازد. از این رو، به کنترلرهای قوی‌تر و پایداری گذرا و دینامیکی سیستم نیاز است. مدل‌سازی RERها به دلیل تصادفی بودن آن‌ها نوعی چالش محسوب می‌شود [۶۸]. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به طور معمول برای مقابله با انرژی‌های تجدیدپذیر در نوسان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶۹-۷۲]. باتری‌های مختلف با کارایی بالا مانند لیتیوم یون، خازن‌های فوق‌العاده و چرخ لنگرها عموماً مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در [۷۱]، نویسندگان برای ادغام فتوولتائیک (PV)، سیستم ذخیره انرژی هیبریدی مبتنی بر ابر خازن را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین در [۶۸]، نویسندگان مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ذخیره انرژی را برای یک ریزشبکه تولیدکننده ارائه نموده‌اند. همچنین در [۷۲]، موکیت و همکاران، مزایای هزینه سیستم‌های ذخیره انرژی مبتنی بر باتری را در محیط SG ارائه کرده‌اند که در آن، مصرف‌کننده می‌تواند انرژی مازاد خود را با شبکه مبادله کند. در [۶۹]، نویسندگان اثرات تخریب عمر ذخیره‌سازی باتری برای یک ریزشبکه جزیره‌ای را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در [۴]، بررسی جامع روندهای ذخیره‌سازی نوین در رابطه با ایستگاه‌های شارژ EV ارائه شده است.

طبق یافته‌های به دست آمده، سیستم‌های الکترونیکی قدرت در ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی در SG از نقش اساسی و مؤثری برخوردار هستند [۷۰]. در [۷۳]، نویسندگان مسائل مربوط به کیفیت توان مرتبط با ادغام متناوب منبع برق در شبکه الکتریکی را مورد بررسی قرار داده و به اثرات دستگاه‌های الکترونیکی، نظیر ترانزیستورها، دیودها و سیستم‌های انتقال متناوب AC انعطاف‌پذیر (FACT) در این گونه مسائل پرداخته‌اند. همچنین،

چالش‌های نفوذ انرژی خورشیدی و بادی را نیز مورد بحث قرار داده‌اند. بوتو و همکاران [۷۴]، چالش‌ها و پیشرفت انرژی PV و پتانسیل منطقه‌ای انرژی PV و وضعیت موجود آن را توصیف کرده‌اند. بر طبق یافته‌های به‌دست آمده، نیروگاه‌های آبی در مقیاس کوچک (۱-۳۰ مگاوات) و میکرو-آبی رودخانه‌ای (۱۰۰-۱ کیلووات) می‌توانند از نقش مهمی برخوردار باشند. از آنجا که ساخت آن‌ها مستلزم زمان و هزینه کمتری است، در نتیجه در ارائه برق ارزان در مدت زمان کمتر می‌تواند از نقش حیاتی برخوردار باشد. متأسفانه از آنجا که آب به دلیل نبود سدهای بزرگ هدر می‌رود، از این‌رو ساخت سدهای مخزنی جنبه سیاسی یافته است. در چنین شرایطی برای تأمین انرژی کشور می‌توان نیروگاه‌های کوچک و ریزآبی بسیاری را در کنار رودخانه‌ها و کانال‌ها نصب نمود [۷۵]. با وجود این، به دلیل اینکه سدهای مخزنی از نقشی محوری در ارائه انرژی ارزان در بلندمدت برخوردار هستند، نمی‌توان نقش آن‌ها را نادیده گرفت.

۴-۳- سیستم انتقال هوشمند

این شبکه به انتقال نیرو به مسافت‌های طولانی می‌پردازد. همچنین به دلیل چالش‌هایی نظیر فرسایش اجزاء، برای مدرن‌سازی شبکه زیرساخت‌های تقاضای فزاینده و استفاده از فناوری‌های توانمند، نوعی الزام تلقی می‌شود. برای حفظ ثبات سیستم، یک شبکه انتقال سالم از نقش حیاتی برخوردار است. شبکه انتقال هوشمند متشکل از سه بخش مرکز کنترل هوشمند، شبکه هوشمند انتقال برق و پست هوشمند است [۷۶]. شایان ذکر است که مراکز کنترل هوشمند، آینده ویژگی‌های جدیدی نظیر اندازه‌گیری و گردآوری داده‌های مرتبط با وضعیت شبکه را از طریق کنتور، حسگرها و کانال‌های ارتباطی، قابلیت‌های تحلیلی برای تحلیل و تخمین وضعیت، نظارت بر وضعیت شبکه و تجسم امکان‌پذیر می‌کند [۷۷].

به عبارت دیگر، می‌توان این گونه عنوان نمود که شبکه انتقال هوشمند، پیشرفت شبکه موجود با افزودن حسگرها، فناوری‌های ارتباطی، موتورهای محاسباتی و پردازنده‌های سیگنال است که می‌تواند به بهبود مصرف انرژی، کیفیت توان، قابلیت اطمینان سیستم و امنیت منجر شود. در [۷۸]، نویسندگان به این موضوع پرداخته‌اند که ساختار اصلی یک پست فشار قوی با گذشت زمان دچار تغییر نشده است؛ اما نظارت، اندازه‌گیری و کنترل‌کننده‌های سیستم با تغییراتی همراه بوده‌اند. شایان ذکر است که پیشرفت‌های یک پست هوشمند شامل اندازه‌گیری و انتقال داده، تخمین وضعیت، تجسم، دیجیتالی‌سازی نمایشگرها، عملکرد خودکار، هماهنگی و خودترمیمی است.

۴-۴- شبکه توزیع هوشمند

از آنجا که شبکه توزیع در خدمت کاربران نهایی است، از این‌رو در ارائه خدمات با کیفیت بسیار بالا از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است. در آینده، سیستم توزیع مجهز به DERهایی خواهد بود که سیستم را انعطاف‌پذیرتر، پایدارتر، کیفی‌تر و کارآمدتر و پخش بار را پیچیده‌تر می‌کنند. در [۷۹]، تاکانو و همکاران به تشریح دو سیستم توزیع انرژی داخلی پرداخته‌اند که برق را با اطلاعات اضافه‌شده به انرژی توزیع می‌کند. اولین طرح پیشنهادی، یک سیستم سوئیچینگ مدار است که اساساً مبتنی بر توزیع برق متناوب (AC) و دیگری یک سیستم توزیع برق جریان مستقیم (DC) از طریق بسته‌های انرژی است. بسته‌بندی توان، روشی چالش‌برانگیز محسوب می‌شود؛ اما مبتنی بر دستگاه‌های سوئیچینگ توان بالا است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که ترانزیستورهای اثر میدانی گیت اتصال کاربید سیلیکون می‌توانند بسته‌هایی از توان الکتریکی را ارائه دهند [۸۰]. نویسندگان در [۷۹]، یک روتر برق هوشمند را که انرژی را به بسته‌هایی تقسیم می‌کند، مورد بحث قرار دادند. هدرها و فوترها با یک واحد انرژی برای ایجاد یک بسته

قدرت مرتبط هستند. در سمت دریافت، هر بسته توسط یک روتر به آدرسی که در هدر ذکر شده است، هدایت می‌شود؛ سپس به بار مربوطه ارسال شده و به کارایی بهتر برق منتقل شده به خانه منجر می‌شود. درواقع، می‌توان این گونه عنوان نمود که هدف اصلی اتوماسیون توزیع، تنظیمات بلادرنگ برای تغییر بارها، کنترل تولید متصل به سیستم توزیع برق، سوئیچینگ، خودترمیمی یا بازایی در هنگام خطا یا شرایط غیرعادی و کنترل خودکار جریان انرژی بدون دخالت اپراتور است. بدیهی است که این امر نیازمند کنترل دستگاه‌های میدانی از طریق کنترل مرکزی یا توزیع شده است. شایان ذکر است که اطلاعات به‌دست آمده از کنتورها و انتقال آن به کنترل‌کننده‌ها از طریق رسانه ارتباطی صورت می‌گیرد.

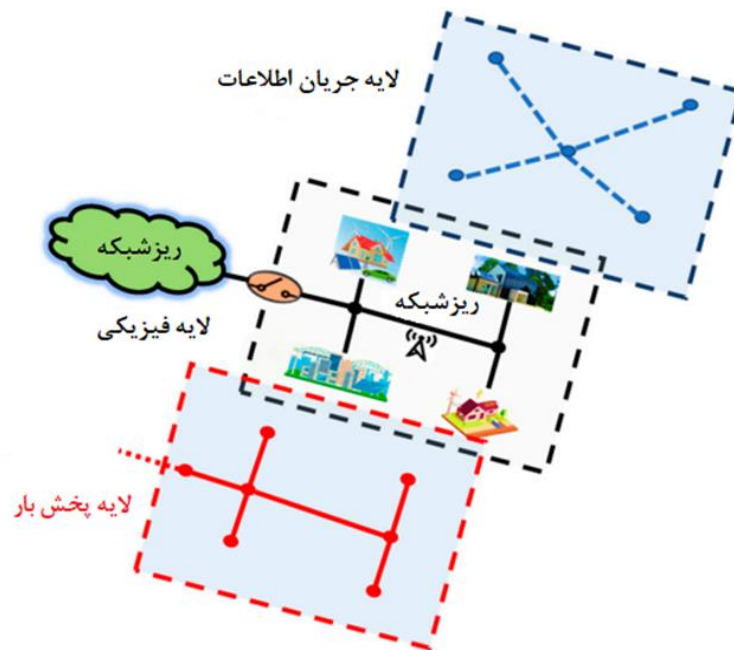
۴-۵- استفاده هوشمند

در SG، بخش بهره‌برداری از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است. نهادهای مختلف نظیر فروشنده [۶۸، ۷۲]، افراد و سازمان‌های نیازمند به خانه‌های هوشمند پاسخگو، ساختمان‌های هوشمند [۱۱، ۶۶]، بارهای انعطاف‌پذیر و غیره، خواستار ارائه ویژگی‌های هوشمندی در استفاده از برق هستند. همچنین برای مدیریت انرژی موجود با پاسخ به تقاضا و تکنیک‌های مختلف، سیستم مدیریت انرژی استفاده می‌شود [۲، ۱۴، ۱۹]. علاوه بر این، سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوشمند در کاربردهای هوشمند از نقش حیاتی برخوردار است. انواع مختلفی از سیستم‌های ذخیره‌سازی برای ذخیره انرژی به‌عنوان پشتیبان استفاده می‌شود. این انرژی ذخیره‌شده برای اهداف مختلفی مانند خرید یا ذخیره الکتریسیته در زمان کم، برنامه تبادل انرژی و اهداف پایداری سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸۱].

۴-۶- ویژگی‌های برجسته شبکه‌های هوشمند

در این بخش، سه الگوی جدید شبکه یعنی ریزشبکه، اتصال خودرو به شبکه (V2G) و شبکه به خودرو (G2V) مورد بحث قرار می‌گیرد.

(۱) ریزشبکه: تولید پراکنده، ایده‌ای از SG به نام ریزشبکه را ارائه می‌دهد. SG دارای اتصال داخلی نصب و اجرای ریزشبکه‌های کوچک است [۶۳]. ریزشبکه، گروهی از مولدها، ذخیره‌سازی و مصرف‌کنندگان است [۸۳]. ریزشبکه می‌تواند در هر دو حالت تزویج‌شده با حالت ماکروشبکه یا جزیره‌ای اجرا شود. در حالت اول می‌تواند برق اضافی را به شبکه ماکرو تغذیه کرده یا از شبکه ماکرو برق را دریافت کند. در حالت دوم، بار خود را به‌صورت مجزا با شبکه ماکرو ارائه می‌دهد. همچنین، یک ریزشبکه را می‌توان در نقطه اتصال مشترک از شبکه ماکرو که به‌طور مستقل کار می‌کند، جدا کرد. در شکل ۵، یک ریزشبکه نشان داده شده است.



شکل ۵. لایه‌های مختلف یک ریزشبکه

مطابق یافته‌های به‌دست آمده، در هنگام خطا چندین محیط ژنراتور توزیع شده با قابلیت جداسازی ماکرو شبکه از ریز شبکه به یک منبع تغذیه قابل اعتماد منجر می‌شوند. این تفکیک برنامه‌ریزی شده به افزایش قابلیت اطمینان در مجاورت محلی در مقایسه با آنچه از سیستم قدرت به عنوان کل به دست می‌آید، منجر می‌شود [۸۴]. شایان ذکر است که در حالت جزیره‌ای، مبادلات برق انجام نشده و تنها تبادل اطلاعات با ریز شبکه صورت می‌گیرد. این اطلاعات، تصویری از ریز شبکه را برای تصمیم‌گیری به موقع جهت اتصال مجدد ارائه می‌دهد.

(۲) $G2V$ و $V2G$: برای اهداف رانش، از یک موتور الکتریکی استفاده می‌کنند. به دلیل اینکه سوخت‌های فسیلی با گذر زمان کاهش یافته و هزینه‌بر می‌شوند، از این رو محبوبیت خودروهای برقی در حال افزایش است. انواع مختلفی از EV نظیر EVهای پلاگین، خودروهای برقی هیبریدی، خودروهای برقی داخل/خارج از جاده، خودروهای برقی ریلی، خودروهای برقی هوابرد و دریایی و فضایی‌های الکتریکی وجود دارد.

استفاده فزاینده از خودروهای برقی عمده‌تأ دارای دو مفهوم تحت عناوین شبکه به خودرو ($G2V$) و خودرو به شبکه ($G2V$) است. در $G2V$ ، خودرو پس از اتمام باتری از طریق شبکه شارژ می‌شود. شارژ خودروها بار قابل ملاحظه‌ای را بر شبکه توزیع وارد می‌کند. در [۴۳]، یک رابط شارژ شبکه به خودرو، برنامه‌ریزی شارژ، کنترل خودرو به شبکه ($V2G$)، الگوریتم عملیات و ریدر شناسایی فرکانس رادیویی و بهینه‌سازی شارژ توصیف شده است. در نهایت، اوج بار شبکه نیز کاهش می‌یابد. در [۸۵]، نویسندگان یک زیرساخت شارژ EV را توصیف می‌کنند که زمان شارژ و مسائل مربوط به کیفیت توان را کاهش می‌دهد. در [۸۶]، نویسندگان خاطرنشان کرده‌اند که شبکه توزیع کنونی در شمال غربی اقیانوس آرام می‌تواند از نفوذ ۵۰ درصدی خودروهای برقی در شبکه که دارای شارژ هوشمند ۱۲۰ ولتی است، پشتیبانی کند. این میزان ۲۱٫۶ درصد از ناوگان خودروهای سبک را تشکیل می‌دهد. شایان ذکر است که سطح نفوذ EV (ها) تقریباً ۱۸ درصد از ظرفیت شناخته‌شده منابع تولید فعلی فراتر رفته است. در ضمن، به دلیل شارژ ناهماهنگ می‌تواند مسائل مبرمی نظیر تخریب سیستم، کاهش ناکارآمدی و حتی بارگذاری بیش از حد شبکه روی دهد [۸۷].

بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، از طریق هماهنگی شارژ می‌توان از بارگذاری بیش‌ازحد و کاهش عملکرد بعدی جلوگیری نمود. مطابق یافته‌های کلمنت و همکاران، هماهنگ‌سازی شارژ EV (ها) با تسطیح بار شبکه، به کاهش تلفات انرژی سیستم و تغییرات VAR/ ولت منجر می‌دهد. در سیستم اتصال خودرو به شبکه، خودروهای برقی روش جدیدی را برای ذخیره و سپس، تزریق انرژی ارائه می‌کنند. در صورتی که EV (ها) پارک شده و در ارتباط با شبکه برق باشند، انرژی را به شبکه برق بازمی‌گردانند. در ایالات متحده، یک خودروی برقی معمولاً به‌طور میانگین تنها یک ساعت در روز حرکت می‌کند [۸۹] و در بیشتر ساعات روز پارک می‌شود. سه روش برای انتقال برق وجود دارد:

۱- EV انرژی را از سوخت ذخیره‌شده تولید کرده و در ساعات اوج مصرف انرژی، برق را از ژنراتور برای یک شرکت برق تولید می‌کند. این نوع از خودروها می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی توزیع‌شده عمل کنند.

۲- یک EV که برق شبکه را تأمین می‌کند، در ساعات اوج مصرف برق از یک باتری قابل شارژ استفاده می‌کند. خودروهای برقی در ساعات کم‌بار با نرخ ارزان مجدداً شارژ می‌شوند. این ناوگان وسیله نقلیه به‌عنوان DG عمل کرده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهند.

۳- خودروهای خورشیدی برای تأمین انرژی شبکه الکتریکی می‌توانند از شارژ اضافی استفاده کنند. در حقیقت، این نوع خودروها به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع‌شده کوچک عمل می‌کنند.

امروزه، محققان در رابطه با اتصال باتری شبکه [۹۰، ۹۱]، ارائه خدمات [۹۰] و بازار در حال ظهور آن [۹۲]، مطالعاتی را انجام داده‌اند. شرکت‌ها در حال انجام آزمایش‌هایی در زمینه V2G هستند. همچنین، EV با تزریق مجدد برق به شبکه انرژی در ساعات اوج بار و در افزایش بار در ساعات غیر اوج با شارژ مجدد EV در ساعات غیر اوج بار، از نقش مهمی در پیک سایی برخوردار هستند. هاتسون و همکاران [۹۳] از یک الگوریتم PSO باینری برای دستیابی به راهکارهای بهینه استفاده می‌کنند که با برآوردن سیستم و نیز محدودیت‌های مالک خودرو، سود را برای مالکان افزایش می‌دهد. به عبارتی، می‌توان این‌گونه عنوان نمود که PSO یک روش بهینه‌سازی تصادفی تکراری است که برای مسائل غیرخطی، پیچیده، غیرقابل تمایز، اندازه بزرگ و ناپیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. یانیک و همکاران، اقدام احتمالی سیاست عمومی در خصوص خودروهای برقی را تعریف کرده‌اند. همچنین در [۹۴]، موانع استفاده از EV و راهکارهای آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵- سیستم مدیریت انرژی هوشمند

در یک SG، جریان دوطرفه انرژی الکتریکی و داده‌ها که باعث بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه جاری، برابری تقاضا و عرضه، کنترل انتشار کربن و افزایش منابع مفید می‌شود، به نحو مؤثری پشتیبانی می‌شوند. برخی معتقدند در صورتی که زیرساخت‌ها هوشمند شوند، همین موضوع کافی است. با وجود این، این ایده چندان صحیح نبوده و روش‌های مدیریت جدید نیز برای بهبود عملکرد کلی شبکه برق حائز اهمیت هستند [۹۵].

طبق یافته‌های به‌دست آمده، پاسخ تقاضا، با ارزش‌ترین مفهوم SG تلقی می‌شود. در شرکت‌های الکتریکی معمولی، اقداماتی برای تطبیق تولید با تقاضا صورت می‌شود [۷۲]. با این حال، این موضوع در بلندمدت بسیار پرهزینه است؛ زیرا بار غیرقابل پیش‌بینی بوده و به‌طور فصلی افزایش یافته و مستلزم ظرفیت تولید اضافی است. همچنین، بایستی نیروگاه‌هایی وجود داشته باشند که از قابلیت پاسخگویی به تغییرات سریع در مصرف انرژی برخوردار باشند. ۱۰ درصد ظرفیت تولید (رزرو چرخان) در کمتر از ۱ درصد مواقع مورد نیاز است [۹۶]. عدم تطابق عرضه با تقاضا می‌تواند به قطع شدن انشعابات مختلف و حتی خاموشی (قطع برق) منجر شود. در یک SG، پاسخ تقاضا به‌صورت کاملاً هوشمندانه مصرف انرژی مصرف‌کننده در برابر شرایط عرضه را مدیریت می‌کند. یک SG برای بارگذاری نیازی به

تطبیق تولید ندارد. در عوض، با جلب رضایت مصرف‌کنندگان یا از طریق فناوری کنترل، تقاضا در برابر عرضه را برابر می‌کند [۶۶].

۵-۱- اهداف اصلی مدیریت انرژی

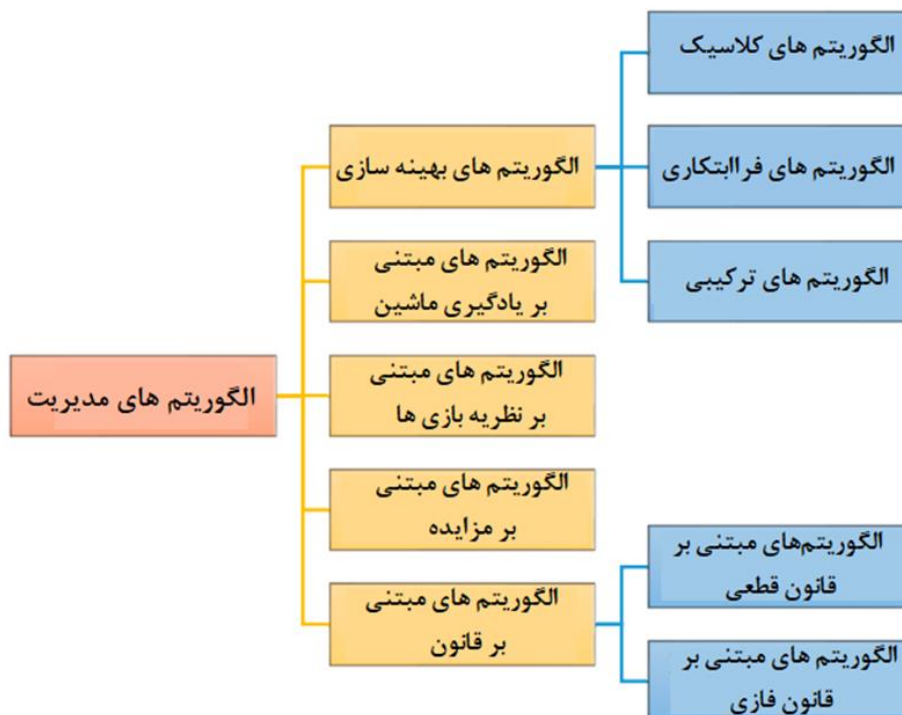
ابزارهای مختلفی به منظور مدیریت در این بخش ارائه شده است که عبارت‌اند از:

- بهره‌وری انرژی
- بهبود نمایه تقاضا
- بهینه‌سازی ابزار
- بهینه‌سازی هزینه
- تثبیت قیمت
- کنترل انتشار

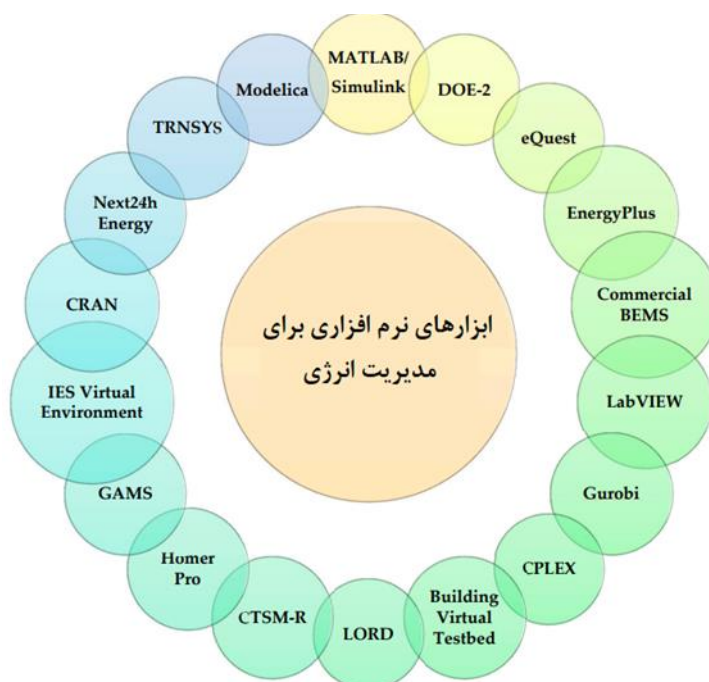
اولین و مهم‌ترین مرحله شکل‌دهی به نمایه، تقاضا است. نمایه تقاضا باعث شکل‌دهی بار شده و بار را با تولید موجود مطابقت می‌دهد. یکی از تکنیک‌های دستیابی به پاسخ تقاضا، جابه‌جایی، زمان‌بندی و کاهش تقاضا از طریق کنتورهای هوشمند است [۹۸-۱۰۷]. در صورت کاهش پیک تقاضا، طول عمر سیستم، تلفات، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سرمایه‌گذاری برای افزایش، ارتقا و نصب نیروگاه‌ها و تجهیزات جدید کاهش می‌یابد. در [۹۸]، نویسندگان یک روش کنترل و بهینه‌سازی را ارائه کرده و برای تغییر شکل نمایه تقاضا بر الگوریتم‌های کنترل متمرکز شده‌اند. کسید و کارون، یک روش قیمت‌گذاری را طراحی کرده‌اند تا تسهیلاتی را برای مشتریان جهت دستیابی به نمایه بار مناسب به وجود آورند.

۵-۲- تکنیک‌ها و ابزارهای مدیریت انرژی

در شکل ۶، ابزارهای متعددی در رابطه با مسائل مدیریتی عنوان شده است. در شکل ۷، ابزارهای مختلف مورد استفاده برای مدیریت انرژی ارائه شده است. برای بهینه‌سازی، الگوریتم‌های ریاضی کلاسیک برنامه‌ریزی محدب [۱۱۶] و برنامه‌ریزی پویا [۱۴۰] ارائه شده‌اند. همچنین، به دلیل ماهیت غیرقابل پیش‌بینی منابع متناوب، برنامه‌ریزی تصادفی [۸۸] و برنامه‌ریزی استواری [۱۱۳] نیز استفاده می‌شود. در ضمن، الگوریتم فراابتکاری رایج PSO می‌تواند به سرعت و به روشی دقیق، بدون کاهش ابعاد [۹۳]، مسائل بهینه‌سازی محدود بسیار پیچیده را حل کند.



شکل ۶. روش‌ها و ابزارهای مدیریت انرژی



شکل ۷. ابزارهای نرم‌افزاری که برای مدیریت انرژی استفاده می‌شوند.

بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، یادگیری ماشینی بر توسعه الگوریتم‌هایی متمرکز است و باعث می‌شود هر کنترل‌کننده، رفتار خود را از طریق داده‌های تجربی به‌دست آمده از حسگرها و PMU بهبود بخشد [۱۴۳-۱۴۶]. اونیل و همکاران [۱۰۵] با استفاده از برنامه‌های کاربردی یادگیری آنلاین برای کنترل مصرف انرژی خانگی، تأثیر تصمیمات مصرف‌کنندگان و قیمت انرژی بر هزینه را مورد محاسبه قرار دادند. فانگ و همکاران [۱۱۴] با استفاده از یادگیری ماشین آنلاین، استفاده از انرژی تجدیدپذیر را در یک ریزشبکه در حالت جزیره‌ای مورد تحلیل قرار دادند.

نظریه بازی [۱۴۷]، ابزاری مؤثر برای مدیریت SG بوده و در توسعه طرح‌هایی برای مقابله با این موارد مؤثر است. برای مثال، ایارس و همکاران [۱۰۲]، راهکارهای توزیع شده مبتنی بر بازی را برای دستیابی به یک بهینه محلی برای هر مشتری خودمحور ارائه دادند. این مورد، یک راهکار بهینه سراسری محسوب می‌شود. در [۱۰۴]، نویسندگان بهینه سراسری را از طریق تعرفه‌های قیمت گذاری در تعادل نش مورد محاسبه قرار دادند. بازار برق انحصاری دارای ریز شبکه [۱۰۰] را می‌توان با نظریه بازی مدل‌سازی نمود. مزایده [۱۴۸] می‌تواند از نقش مهمی در SG برخوردار باشد. ریز شبکه‌ها و DG‌ها به نحو گسترده‌تری در SG‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، مزایده و مناقصه از نقش مؤثری برخوردار خواهند بود. در [۱۴۹]، یک روش مناقصه کاهش تقاضا ارائه شده است.

۶- سیستم حفاظت از توان الکتریکی هوشمند

این سیستم بایستی از قابلیت محافظت شبکه در برابر خطاهای ناشی از خطای انسانی، خرابی تجهیزات و بلایای طبیعی و همچنین، حملات سایبری برخوردار باشد. یکی از راه‌های بهبود سیستم قدرت، استقرار یک سیستم حفاظتی هوشمند است.

۶-۱- حفاظت هوشمند در برابر خرابی

قابلیت اطمینان بر توانمندی سیستم برای انجام عملکردهای موردنظر و برآوردن مجموعه‌ای از شرایط اشاره دارد. قابلیت اطمینان به عوامل متعددی نظیر جمع‌آوری اطلاعات از دستگاه‌های میدانی، مسیریابی آن‌ها به کنترلرها، مسیریابی دستورالعمل‌های کنترل به سوئیچ‌ها و اتخاذ روش‌های استاندارد برای نگهداری تجهیزات بستگی دارد.

۶-۲- قابلیت اطمینان سیستم هوشمند

DG‌ها تا حد زیادی در SG‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از برخی انرژی‌های تجدیدپذیر ممکن است به کاهش پایداری شبکه منجر شود [۱۵۵-۱۵۷]. از این رو برای بهبود پایداری، استفاده از کنترل‌کننده‌ها و رابط‌های معماری و طرح‌های جدید ضروری است. با اضافه شدن انرژی خورشیدی، اینرسی جمعی سیستم قدرت کاهش یافته؛ در نتیجه، ثبات حالت پایدار و پویا کاهش می‌یابد. چن و همکاران [۱۵۶] در زمان کاهش خرابی‌های آبخاری در SG مزایای استفاده از RER‌های توزیع شده را مطرح کردند. به عبارتی، می‌توان این گونه عنوان نمود که به دلیل وجود ریز شبکه‌ها، توان کمتری از شبکه جریان یافته و بدین ترتیب، قابلیت اطمینان و پایداری شبکه افزایش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که استفاده از تعداد کمی از DG‌ها می‌تواند احتمال خرابی‌های زنجیره‌ای (آبخاری) را کاهش دهد. مصلحتی و کومار [۱۵۲] اثبات کردند که ترکیب منابع SG مناسب، بار روان‌تری را ارائه داده و به بهبود قابلیت اطمینان منجر می‌شود.

طبق یافته‌های به دست آمده، پایداری و قابلیت اطمینان نیز به دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترل مانند سنسورها، PMU‌ها، گاورنرها، تحریک‌کننده‌ها، تثبیت‌کننده‌های سیستم قدرت، رله‌ها و مدارشکن‌ها و غیره بستگی دارد [۱۵۸-۱۶۰]. امروزه، سیستم‌های اندازه‌گیری سطح وسیع مبتنی بر PMU (WAMS) [۱۶۱] به طور فزاینده‌ای رواج یافته‌اند. همچنین برای ارزیابی قابلیت اطمینان، تکنیک‌های شمارش حالت و مدل‌سازی مارکوف [۱۶۲] ترکیب می‌شوند. بو غسن و همکاران [۱۶۳] از یک طرح افزایشی استفاده کرده و شبیه‌سازی را توسعه داده‌اند که در آن، سیستم می‌تواند به روشی مقیاس‌پذیر برای شبیه‌سازی رفتار شبکه طراحی شود. گادفری و همکاران [۱۶۴]، مدلی را برای مطالعه اثرات خرابی ارتباط سیستم قدرت ارائه کردند.

پیش‌بینی خرابی‌ها و اقدامات اصلاحی (پیشگیری) از نقش مؤثری در پایداری شبکه برخوردار است. در صورت وقوع خرابی، شناسایی، تشخیص و بازیابی آن حائز اهمیت است [۱۵۱]. همچنین برای پیش‌بینی ایرادات بایستی نقاط ضعف سیستم شناسایی شود و اقدامات لازم برای پیشگیری از آن‌ها انجام گیرد. چرتکوف و همکاران [۱۶۵] روشی را ارائه نمودند که از قابلیت شناسایی گره ضعیف برخوردار بوده و در پیش‌بینی خطا مؤثر است. وایمن و همکاران [۱۶۶] از داده‌های به‌دست‌آمده از PMU برای محاسبه منطقه پایداری و حاشیه عملیاتی استفاده نمودند. همچنین برای پیش‌بینی خرابی، آگاهی موقعیتی از منطقه گسترده (WASA) [۱۶۷] را می‌توان با ترکیب حسگرها، کنتورها، PMUها و رسانه‌های ارتباطی افزایش داد.

۳-۶- شناسایی خرابی هوشمند

پس از بروز خطا، گام اولیه، تشخیص سریع علت و شناسایی رویدادهای آشنایی و بازیابی خرابی است [۱۶۸]. نویسندگان [۱۶۹] از داده‌های PMU برای تشخیص خطا استفاده کرده‌اند. محققان، الگوریتمی را ارائه داده‌اند که در آن از توپولوژی شبکه و اندازه‌گیری زاویه PMU برای تشخیص قطعی خط استفاده می‌شود. در [۱۷۰]، نویسندگان روشی را برای تشخیص قطعی خط دوگانه ارائه دادند. در این روش پیشنهادی از توپولوژی قطعی مجدد و اندازه‌گیری زاویه PMU استفاده می‌شود. ژو و ابور [۱۶۹] اثبات کرده‌اند که محدودیت داده‌های متداول را می‌توان با داده‌های PMU رفع نمود. تحقیقات دیگر در خصوص شناسایی و تشخیص قطعی در [۱۷۱-۱۷۴] ارائه شده است. کای و همکاران [۱۷۱]، الگوریتم‌هایی را برای ردیابی اطلاعات از ابرداده‌ها ارائه دادند. او و ژانگ [۱۷۴] برای مدل‌سازی داده‌های PMU از یک روش گرافیکی مبتنی بر احتمال استفاده کردند. کالدرارو و همکاران [۱۷۲]، یک شبکه پتری را برای مدل‌سازی سیستم توزیع و شناسایی قطعی ارائه کردند. راسل و بنر [۱۷۳]، روش‌هایی را برای تشخیص خطاهای اولیه از شکل موج‌ها ارائه دادند.

در طول بروز خطاها، برای جلوگیری از خاموشی می‌توان شبکه برق را به جزایر تقسیم کرد [۱۷۵]. همچنین، این جزایر می‌توانند تثبیت شوند و بعدها مجدداً همگام شوند. با کنترل مناسب پیکربندی سیستم و تأثیر اختلال می‌توان کارایی سیستم را افزایش داد [۱۷۶]. به‌علاوه، ممکن است زمانی که داده‌های مخرب به آن‌ها تزریق شود، کنتورهای هوشمند از کار بیفتند. چن و همکاران [۱۷۷]، یک روش تسطیح B-spline و تسطیح هسته را برای پاک‌سازی داده‌های مخرب ارائه کردند. طبق یافته‌های اورمن و ساکمن [۱۷۸]، هوش توزیع شده (کنترل) بهتر از مرکزی بوده و در افزایش قابلیت اطمینان سیستم مؤثر است.

۴-۶- امنیت و حریم خصوصی اطلاعات

دیجیتالی‌سازی شبکه برق در تمامی سطوح منبع ابر داده است. همچنین، امنیت و حریم خصوصی این داده‌ها برای عملکرد قابل اعتماد و ایمن SG حائز اهمیت است. در صورت ایمن نبودن داده‌ها، کل سیستم ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. در [۱۷۹]، نویسندگان در خصوص پیشینه زیرساخت‌های ارتباطی، ویژگی‌های اصلی، چالش‌ها و الزامات آن‌ها به بحث پرداخته‌اند. در میان چالش‌های مختلف، اطلاعات ایمن به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. یان و همکاران، الزامات و تهدیدات امنیت سایبری را در ارتباطات SG خلاصه کردند [۱۸۰]. بر اساس یافته‌های نویسندگان، ایمن‌سازی SG نیازمند استفاده از پروتکل‌های پیشرفته بوده و صحت و حفاظت از داده‌ها بایستی در تمامی سطوح در نظر گرفته شود. در [۳۵]، بررسی مسائل مختلف مربوط به امنیت سایبری و راهکارهای احتمالی آن‌ها در سیستم‌های انتقال هوشمند تشریح شده است.

۷- نتیجه‌گیری

SG سیستم برق نوینی است که به روشی ایمن، هر دو مورد خدمات شهری و کاربر نهایی را تسهیل می‌کند. در پژوهش حاضر، جنبه‌های مختلف SG با در نظر گرفتن چالش‌ها و راهکارهای ارائه‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. یافته‌های به‌دست آمده در زمینه SG به شرح زیر است:

اولاً، پروژه‌های ایجاد یک SG بایستی پیش از راه‌اندازی به‌خوبی مورد تحلیل قرار گیرند. سپس، پروژه‌های در حال انجام توسط شرکت‌های برق نظارت شوند. دوماً، تکامل SG ممکن است مستلزم مشارکت سازمان‌هایی با تجربه بیشتر باشد. سوماً، اصطلاح هوشمند در "شبکه هوشمند" به این معناست که شبکه، دستیابی به اهداف و عملکردهای مدیریت نوین را امکان‌پذیر می‌کند. اهداف پژوهش حاضر عبارت‌اند از برابری بار و تولید، بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه عملیات، به حداکثر رساندن ابزار و کنترل انتشار. با این حال، این موضوع به این معنا نیست که تجربه و تحقیق در سایر بخش‌ها نظیر لوازم الکترونیکی مصرفی و توسعه نرم‌افزار از اهمیت کمتری برخوردار است. دیگر اینکه، دو موضوع در خصوص حفاظت حائز اهمیت است؛ آموزه اول در خصوص مطالعه رفتار مفید انرژی و اینکه نباید امنیت و حریم خصوصی را کم‌اهمیت شمرد و آموزه دوم، اینکه بایستی ریسک‌های احتمالی ارائه فناوری‌های جدید مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌طور خلاصه می‌توان این‌گونه عنوان نمود که SG به نحو مؤثری به ایجاد یک شبکه الکتریکی سازگار با محیط‌زیست و یک سرویس تأمین انرژی بهبودیافته منجر می‌شود که از قابلیت ایجاد تحول در زندگی روزمره برخوردار است.

منابع

1. Wu, Y., Wang, Z., Huangfu, Y., Ravey, A., Chrenko, D., & Gao, F. (2022). Hierarchical operation of electric vehicle charging station in smart grid integration applications—An overview. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 139, 108005.
2. Shahab, M., Wang, S., & Abd ul Muqeet, H. (2021, September). Advanced optimal design of the IoT based university campus microgrid considering environmental concerns and demand response. In *2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)* (pp. 798-802). IEEE.
3. Mehmood, M. Y., Oad, A., Abrar, M., Munir, H. M., Hasan, S. F., Muqeet, H. A. U., & Golilarz, N. A. (2021). Edge computing for IoT-enabled smart grid. *Security and Communication Networks*, 2021(1), 5524025.
4. Ali, A., Shakoor, R., Raheem, A., Muqeet, H. A. U., Awais, Q., Khan, A. A., & Jamil, M. (2022). Latest energy storage trends in multi-energy standalone electric vehicle charging stations: A comprehensive study. *Energies*, 15(13), 4727.
5. Muqeet, H. A., Munir, H. M., Javed, H., Shahzad, M., Jamil, M., & Guerrero, J. M. (2021). An energy management system of campus microgrids: State-of-the-art and future challenges. *Energies*, 14(20), 6525.
6. Javed, H., & Muqeet, H. A. (2021). Design, model & planning of prosumer microgrid for MNSUET multan campus. *Sir Syed Univ. Res. J. Eng. Technol*, 11(2), 1-7.
7. Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. Smart Grid—The New and Improved Power Grid: A Survey, Communications Surveys & Tutorials. *IEEE*, 14, 950-956.
8. Stephenson, J., Ford, R., Nair, N. K., Watson, N., Wood, A., & Miller, A. (2018). Smart grid research in New Zealand—A review from the GREEN Grid research programme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1636-1645.
9. Awais, Q., Jin, Y., Chattha, H. T., Jamil, M., Qiang, H., & Khawaja, B. A. (2018). A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting. *IEEE Access*, 6, 35857-35866.
10. Gulzar, M. M., Iqbal, M., Shahzad, S., Muqeet, H. A., Shahzad, M., & Hussain, M. M. (2022). Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review. *Energies*, 15(10), 3488.

11. Javed, H., Muqeet, H. A., Shehzad, M., Jamil, M., Khan, A. A., & Guerrero, J. M. (2021). Optimal energy management of a campus microgrid considering financial and economic analysis with demand response strategies. *Energies*, 14(24), 8501.
12. Khan, T., Waseem, M., Muqeet, H. A., Hussain, M. M., Yu, M., & Annuk, A. (2022). 3E analyses of battery-assisted photovoltaic-fuel cell energy system: Step towards green community. *Energy Reports*, 8, 184-191.
13. Balouch, S., Abrar, M., Abdul Muqeet, H., Shahzad, M., Jamil, H., Hamdi, M., ... & Hamam, H. (2022). Optimal scheduling of demand side load management of smart grid considering energy efficiency. *Frontiers in Energy Research*, 10, 861571.
14. Javed, H., Irfan, M., Shehzad, M., Abdul Muqeet, H., Akhter, J., Dagar, V., & Guerrero, J. M. (2022). RETRACTED: Recent Trends, Challenges, and Future Aspects of P2P Energy Trading Platforms in Electrical-Based Networks Considering Blockchain Technology: A Roadmap Toward Environmental Sustainability. *Frontiers in Energy Research*, 10, 810395.
15. Gharavi, H., & Ghafurian, R. (Eds.). (2011). *Smart grid: The electric energy system of the future* (Vol. 99, pp. 917-921). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
16. Muqeet, H. A., Shahzad, M., Shehzad, M., Akhter, J., Almohaimeed, Z. M., Akram, R., & Hussain, M. M. (2022). IoT-based intelligent source-load-storage coordination scheme for prosumer campus microgrids. *Frontiers in Energy Research*, 10, 960104.
17. Ali, A., Iqbal, S., Muqeet, H. A., Munir, H. M., Bukhari, S. S. H., Ro, J. S., & Akbar, Z. (2022). Application of 0-1 test for chaos on forward converter to study the nonlinear dynamics. *Scientific Reports*, 12(1), 15696.
18. Bin, L., Shahzad, M., Javed, H., Muqeet, H. A., Akhter, M. N., Liaqat, R., & Hussain, M. M. (2022). Scheduling and sizing of campus microgrid considering demand response and economic analysis. *Sensors*, 22(16), 6150.
19. Fei, L., Shahzad, M., Abbas, F., Muqeet, H. A., Hussain, M. M., & Bin, L. (2022). Optimal energy management system of IoT-enabled large building considering electric vehicle scheduling, distributed resources, and demand response schemes. *Sensors*, 22(19), 7448.
20. Minh, Q. N., Nguyen, V. H., Quy, V. K., Ngoc, L. A., Chehri, A., & Jeon, G. (2022). Edge computing for IoT-enabled smart grid: The future of energy. *Energies*, 15(17), 6140.
21. Khanh, Q. V., Hoai, N. V., Manh, L. D., Le, A. N., & Jeon, G. (2022). Wireless communication technologies for IoT in 5G: Vision, applications, and challenges. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 3229294.
22. Rohjans, S., Uslar, M., Bleiker, R., González, J., Specht, M., Suding, T., & Weidelt, T. (2010, October). Survey of smart grid standardization studies and recommendations. In *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications* (pp. 583-588). IEEE.
23. Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302-318.
24. Tuballa, M. L., & Abundo, M. L. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 710-725.
25. Kovendan, A. K. P., & Sridharan, D. (2017). Development of smart grid system in India: a survey. In *Proceedings of the international conference on nano-electronics, circuits & communication systems* (pp. 275-285). Springer Singapore.
26. Soares, E., Silva, F. E., Barriquello, C. H., Canha, L. N., Bernardon, D. P., & Seizo Hokama, W. (2018, September). Deployment of LoRA WAN Network for Rural Smart Grid in Brazil. In *Proceedings of the 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA), Lima, Peru* (pp. 18-21).
27. Ramalingeswar, J. T., & Subramanian, K. (2019). Micro Grid Operational Issues And Challenges In Smart Grid Scenario While Heterogeneous Micro Level Generations Are Predominant. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng*, 8, 908-917.
28. Kakran, S., & Chanana, S. (2018). Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 524-535.
29. Su, W., Eichi, H., Zeng, W., & Chow, M. Y. (2011). A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(1), 1-10.
30. Brown, H. E., & Suryanarayanan, S. (2009, October). A survey seeking a definition of a smart distribution system. In *41st North American Power Symposium* (pp. 1-7). IEEE.
31. Oyetoyan, T. D., Conradi, R., & Sand, K. (2012, June). Initial survey of Smart Grid activities in the Norwegian energy sector-use cases, industrial challenges and implications for research. In *2012 First International Workshop on Software Engineering Challenges for the Smart Grid (SE-SmartGrids)* (pp. 34-37). IEEE.

32. Ardito, L., Procaccianti, G., Menga, G., & Morisio, M. (2012, March). A survey on smart grid technologies in Europe. In *Proceedings of the Second International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, St. Maarten, The Netherlands* (pp. 25-30).
33. Zou, H., Mao, S., Wang, Y., Zhang, F., Chen, X., & Cheng, L. (2019). A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. *IEEE Access*, 7, 72158-72169.
34. Xu, F., Wu, W., Zhao, F., Zhou, Y., Wang, Y., Wu, R., ... & Jiang, S. (2019). A micro-market module design for university demand-side management using self-crossover genetic algorithms. *Applied Energy*, 252, 113456.
35. Deng, Y., & Shukla, S. (2012). Vulnerabilities and countermeasures—a survey on the cyber security issues in the transmission subsystem of a smart grid. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 250-276.
36. Arabyat, E. A. (2013). Candidate solutions to improve Wireless Mesh Networks WMNs performance to meet the needs of Smart Grid applications-Survey paper. *Int. J. Comput. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 3, 1-9.
37. Liu, N., Cheng, M., Yu, X., Zhong, J., & Lei, J. (2018). Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: A hybrid approach using stochastic programming and stackelberg game. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6740-6750.
38. Wang, D., Guan, X., Liu, T., Gu, Y., Sun, Y., & Liu, Y. (2013, December). A survey on bad data injection attack in smart grid. In *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* (pp. 1-6). IEEE.
39. Peihong, Y., Wenying, L., & Yili, W. (2012). A survey on problems in smart grid with large capacity wind farm interconnected. *Energy Procedia*, 17, 776-782.
40. Grilo, A., Pereira, P. R., Nunes, M. S., & Casaca, A. (2013). A Survey of Communication Technologies for the Low Voltage Distribution Segment in a Smart Grid. In *13a Conference on Computer Networks (CRC' 2013)* (pp. 1-6).
41. Dufour, C., Araújo, S., & Bélanger, J. (2013, April). A survey of smart Grid research and development involving real-time simulation technology. In *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)* (pp. 1-8). IEEE.
42. Kuzlu, M., Pipattanasompom, M., & Rahman, S. (2017, April). A comprehensive review of smart grid related standards and protocols. In *2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)* (pp. 12-16). IEEE.
43. Ali, S., Malik, T. N., & Raza, A. (2020). Risk-averse home energy management system. *IEEE Access*, 8, 91779-91798.
44. Khan, F., ur Rehman, A., Arif, M., Aftab, M., & Jadoon, B. K. (2016, April). A survey of communication technologies for smart grid connectivity. In *2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)* (pp. 256-261). IEEE.
45. Ma, S., Zhang, H., & Xing, X. (2018). Scalability for smart infrastructure system in smart grid: a survey. *Wireless Personal Communications*, 99, 161-184.
46. Masera, M., Bompard, E. F., Profumo, F., & Hadjsaid, N. (2018). Smart (electricity) grids for smart cities: Assessing roles and societal impacts. *Proceedings of the IEEE*, 106(4), 613-625.
47. Khan, H. A., Xu, Z., Iu, H., & Sreeram, V. (2009, September). Review of technologies and implementation strategies in the area of smart grid. In *2009 Australasian Universities Power Engineering Conference* (pp. 1-6). IEEE.
48. Basso, T., & DeBlasio, R. (2012). *IEEE smart grid series of standards IEEE 2030 (interoperability) and IEEE 1547 (interconnection) status* (No. NREL/CP-5500-53028). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
49. Lightner, E. M., & Widergren, S. E. (2010). An orderly transition to a transformed electricity system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1), 3-10.
50. Coll-Mayor, D., Paget, M., & Lightner, E. (2007). Future intelligent power grids: Analysis of the vision in the European Union and the United States. *Energy Policy*, 35(4), 2453-2465.
51. Sucic, S., Bony, B., & Guise, L. (2012, March). Standards-compliant event-driven SOA for semantic-enabled smart grid automation: Evaluating IEC 61850 and DPWS integration. In *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 403-408). IEEE.
52. Almadhor, A. (2018). Feedback-oriented intelligent monitoring of a storage-based solar photovoltaic (pv)-powered microgrid with mesh networks. *Energies*, 11(6), 1446.
53. Brown, I. (2014). Britain's smart meter programme: a case study in privacy by design. *International Review of Law, Computers & Technology*, 28(2), 172-184.
54. Yu, X., & Xue, Y. (2016). Smart grids: A cyber-physical systems perspective. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 1058-1070.

55. Mulla, A., Baviskar, J., Khare, S., & Kazi, F. (2015, April). The wireless technologies for smart grid communication: A review. In *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies* (pp. 442-447). IEEE.
56. Weitzel, T., & Glock, C. H. (2019). Scheduling a storage-augmented discrete production facility under incentive-based demand response. *International Journal of Production Research*, 57(1), 250-270.
57. Elektroprivreda, H. E. (2022). Dd, doo Municipality Idrija Elektro Primorska dd, E. Tisžántúli Áramhálózati Zrt, and J. Elektroprivreda Hrvatske Zajednice Herceg Bosne, *Smart Building Smart Grid Smart City 3Smart 3Smart: Vision for Smart Energy Distribution Systems in the Danube Region*, 3-5.
58. Girbau-Llistuella, F., Díaz-González, F., Sumper, A., Gallart-Fernández, R., & Heredero-Peris, D. (2018). Smart grid architecture for rural distribution networks: application to a Spanish Pilot Network. *Energies*, 11(4), 844.
59. McKenna, E., Richardson, I., & Thomson, M. (2012). Smart meter data: Balancing consumer privacy concerns with legitimate applications. *Energy Policy*, 41, 807-814.
60. Baronti, F., Vazquez, S., & Chow, M. Y. (2018). Modeling, control, and integration of energy storage systems in e-transportation and smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6548-6551.
61. Cavoukian, A., & Kursawe, K. (2012, August). Implementing privacy by design: The smart meter case. In *2012 International Conference on Smart Grid (SGE)* (pp. 1-8). IEEE.
62. Ponce-Jara, M. A., Ruiz, E., Gil, R., Sancristóbal, E., Pérez-Molina, C., & Castro, M. (2017). Smart Grid: Assessment of the past and present in developed and developing countries. *Energy Strategy Reviews*, 18, 38-52.
63. Farhangi, H. (2009). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18-28.
64. Ferreira Filho, A. L., Coura, J. J., & Correia, P. F. (2015, November). The development of Smart Grid in Brazil and the role of universities. In *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)* (pp. 1-5). IEEE.
65. Sadiqa, A., Gulagi, A., & Breyer, C. (2018). Energy transition roadmap towards 100% renewable energy and role of storage technologies for Pakistan by 2050. *Energy*, 147, 518-533.
66. Muqeet, H. A. U., & Ahmad, A. (2020). Optimal scheduling for campus prosumer microgrid considering price based demand response. *IEEE Access*, 8, 71378-71394.
67. Kamran, M. (2018). Current status and future success of renewable energy in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 609-617.
68. Muqeet, H. A., Sajjad, I. A., Ahmad, A., Iqbal, M. M., Ali, S., & Guerrero, J. M. (2019, August). Optimal operation of energy storage system for a prosumer microgrid considering economical and environmental effects. In *2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE)* (Vol. 4, pp. 1-6). IEEE.
69. Sufyan, M., Abd Rahim, N., Tan, C., Muhammad, M. A., & Sheikh Raihan, S. R. (2019). Optimal sizing and energy scheduling of isolated microgrid considering the battery lifetime degradation. *PloS one*, 14(2), e0211642.
70. Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galván, E., PortilloGuisado, R. C., Prats, M. M., ... & Moreno-Alfonso, N. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1002-1016.
71. Shrivastava, A., & Gupta, S. (2017). Review on super capacitor-battery based hybrid energy storage system for PV application. *Int. J. Adv. Eng. Manag. Sci*, 3(4), 378-381.
72. Muqeet, H. A., Ahmad, A., Sajjad, I. A., Liaqat, R., Raza, A., & Iqbal, M. M. (2019, June). Benefits of distributed energy and storage system in prosumer based electricity market. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
73. Kumar, K. P., Venkateshwarlu, S., & Divya, G. (2013). A review on power quality in grid connected renewable energy system. *CVR Journal of Science and Technology*, 5, 57-61.

استناد به این مقاله: حاجیان، حسین. (۱۴۰۳). مروری بر پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های انرژی هوشمند و مدیریت آن‌ها در یک محیط شبکه هوشمند. فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند، ۳(۲)، ۴۷-۶۸.



New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.