Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 15 - No. 1 – Spring 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

A Review of the Role of Integrated Electronic Circuits in the Development of Smart Power Systems Based on New Energies

Najmeh Cheraghi Shirazi[1,2], ***Assistant Professor***

[1] Department of Electrical Engineering, Bu.C., Islamic Azad University, Bushehr, Iran
[2] Department of New Energy Research Center, Bu.C., Islamic Azad University, Bushehr, Iran
na.cheraghi@iau.ac.ir

Abstract:

The rapid growth of energy demand, environmental concerns, and the limitation of fossil resources have made the development of smart power systems based on new energies one of the main axes of research and industry. In the meantime, integrated electronic circuits, as the foundation of monitoring, control, communication, protection, and energy management technologies, play a key role in realizing the intelligent, sustainable, and reliable operation of these systems. This article reviews the role of integrated electronic circuits in the development of smart power systems based on renewable energy sources. First, the basic concepts related to smart power systems, new energies, and integrated electronic circuits are introduced. Then, the application of these circuits in power converters, smart metering systems, protection equipment, energy storage devices, communication infrastructures, and power control and management systems is analyzed. Technical challenges including losses, reliability, electromagnetic noise, cost, cybersecurity, and scalability are also examined, and future trends such as low-power integrated circuits, AI-based smart chips, silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) technologies, and integrated energy internet systems are discussed. The results of this study show that electronic integrated circuits not only increase the efficiency, flexibility, and reliability of smart grids, but also provide a major platform for the wider integration of new energies into future power systems.

Keywords: New energies, smart power systems, smart grid, power electronics, integrated electronic circuits, energy management

Received: 22 Feb. 2026
Revised: 8 Apr. 2026
Accepted: 13 Apr. 2026

*** Corresponding Author:** Najmeh Cheraghi Shirazi (Email: na.cheraghi@iau.ac.ir)

Citation: N. Cheraghi Shirazi, "A review of the role of integrated electronic circuits in the development of smart power systems based on new energies", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 15-49, June 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]

مقاله پژوهشی

مروری بر نقش مدارهای مجتمع الکترونیک در توسعه سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو

نجمه چراغی شیرازی[۱،۲]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
۲- مرکز تحقیقات انرژی‌های نو، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
na.cheraghi@iau.ac.ir

چکیده: رشد سریع تقاضای انرژی، نگرانی‌های زیست‌محیطی، و محدودیت منابع فسیلی، توسعه سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو را به یکی از محورهای اصلی پژوهش و صنعت تبدیل کرده است. در این میان، مدارهای مجتمع الکترونیک به‌عنوان زیربنای فناوری‌های پایش، کنترل، ارتباطات، حفاظت و مدیریت انرژی، نقشی کلیدی در تحقق عملکرد هوشمند، پایدار و قابل اطمینان این سامانه‌ها ایفا می‌کنند. این مقاله به‌صورت مروری، نقش مدارهای مجتمع الکترونیک را در توسعه سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر بررسی می‌کند. ابتدا مفاهیم پایه مرتبط با سیستم‌های قدرت هوشمند، انرژی‌های نو و مدارهای مجتمع الکترونیک معرفی می‌شود. سپس کاربرد این مدارها در مبدل‌های قدرت، سامانه‌های اندازه‌گیری هوشمند، تجهیزات حفاظتی، ادوات ذخیره‌سازی انرژی، زیرساخت‌های ارتباطی، و سامانه‌های کنترل و مدیریت توان تحلیل می‌گردد. همچنین چالش‌های فنی شامل تلفات، قابلیت‌اطمینان، نویز الکترومغناطیسی، هزینه، امنیت سایبری و مقیاس‌پذیری بررسی شده و روندهای آینده نظیر مدارهای مجتمع کم‌مصرف، تراشه‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، فناوری‌های سیلیکون کاربید (SiC) و گالیوم نیترید (GaN) و سامانه‌های یکپارچه اینترنت انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدارهای مجتمع الکترونیک نه‌تنها موجب افزایش بازده، انعطاف‌پذیری و قابلیت-اطمینان شبکه‌های هوشمند می‌شوند، بلکه بستر اصلی برای ادغام گسترده‌تر انرژی‌های نو در سیستم‌های قدرت آینده را فراهم می‌سازند.

کلمات کلیدی: انرژی‌های نو، سیستم‌های قدرت هوشمند، شبکه هوشمند، الکترونیک قدرت، مدارهای مجتمع الکترونیک، مدیریت انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر نجمه چراغی شیرازی
نشانی نویسنده مسئول: بوشهر، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، دانشکده فنی، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، ساختار سیستم‌های قدرت در سراسر جهان دستخوش تحولی بنیادین شده است. گذار از مدل‌های تولید متمرکز مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به سمت شبکه‌های توزیع‌شده و هوشمند، ناشی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیری همچون تغییرات اقلیمی، کاهش ذخایر انرژی فسیلی، و نیاز روزافزون به توسعه پایدار است [۱-۶]. در این پارادایم جدید، ادغام گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر[۱] (RES) مانند نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک [۷،۸]، مزارع بادی [۹،۱۰] و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی[۲] (ESS) [۱۱،۱۲]، به همراه افزایش نفوذ بارها و خودروهای الکتریکی، پیچیدگی بهره‌برداری از شبکه را به سطحی بی‌سابقه رسانده است [۱۳،۱۴]. شبکه قدرت امروزی دیگر یک ساختار منفعل و یک‌سویه نیست، بلکه اکوسیستمی پویا، دوسویه و به‌شدت تعاملی است که پایداری آن در گرو هوشمندی در تمامی سطوح است [۱۵،۱۶].

سیستم قدرت هوشمند[۳] به عنوان راه‌حلی برای این پیچیدگی‌ها، بر پایه ادغام فناوری‌های دیجیتال، حسگرهای پیشرفته، مخابرات بلادرنگ و الگوریتم‌های هوشمند استوار است [۱۷،۱۸]. با این حال، تحقق عملیاتی این مفاهیم، فراتر از نرم‌افزار و زیرساخت‌های مخابراتی، به پیشرفت‌های جهش‌گونه در سخت‌افزار الکترونیکی وابسته است [۱۹،۲۰]. در این میان، مدارهای مجتمع الکترونیک[۴] (IC) به عنوان مغز متفکر و قلب تپنده تجهیزات مدرن قدرت، نقشی بی‌بدیل ایفا می‌کنند. بدون وجود تراشه‌های پیشرفته با توان پردازشی بالا، مصرف انرژی پایین و قابلیت‌اطمینان صنعتی، پیاده‌سازی مفاهیمی نظیر کنترل تطبیقی، پایش وضعیت بلادرنگ[۵] و حفاظت هوشمند در شبکه، عملاً غیرممکن خواهد بود [۲۱،۲۲].

چالش اصلی در شبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های نو، ماهیت غیرقطعی و نوسانی تولید توان است. مبدل‌های الکترونیک قدرت به عنوان واسط‌های اصلی میان این منابع و شبکه، برای مدیریت صحیح تزریق توان، همگام‌سازی با شبکه و حفظ کیفیت توان، نیازمند کنترل‌کننده‌های مجتمعی هستند که بتوانند با سرعت نانوثانیه تصمیم‌گیری کنند. از سوی دیگر، حسگرهای مبتنی بر تراشه‌های مجتمع[۶]، امکان پایش دقیق وضعیت در سطوح مختلف ولتاژی را فراهم کرده‌اند که خروجی آن‌ها داده‌های عظیم[۷] برای الگوریتم‌های مدیریت انرژی است. این همگرایی میان «الکترونیک مجتمع» و «توان الکتریکی»، حوزه‌ای نوین موسوم به «الکترونیک قدرت هوشمند» را شکل داده است که فراتر از تبدیل ساده سطح ولتاژ، به هوش مصنوعی و خودترمیمی در مقیاس تراشه می‌اندیشد [۲۳،۲۴].

با این وجود، استفاده از مدارهای مجتمع در سیستم‌های قدرت با چالش‌های فنی متعددی مواجه است. لزوم عملکرد دقیق در محیط‌های صنعتی با نویز الکترومغناطیسی شدید، نیاز به تحمل دماهای عملیاتی بالا، دغدغه‌های امنیتی در برابر حملات سایبری به زیرساخت‌های سخت‌افزاری، و فشار برای کاهش هزینه‌های تمام‌شده در کنار افزایش چگالی توان، همگی از مواردی هستند که مرزهای طراحی مدارات مجتمع را به چالش کشیده‌اند [۲۷-۲۵].

این مقاله با هدف بررسی نقش حیاتی و تحول‌آفرین مدارهای مجتمع در سیستم‌های قدرت هوشمند تنظیم شده است. در بخش‌های پیش‌رو، ضمن تبیین تعامل میان مبانی مهندسی برق قدرت و فناوری مدارهای مجتمع، کاربردهای کلیدی این تراشه‌ها در سیستم‌های انرژی نو تحلیل شده و چالش‌های موجود و افق‌های پیش رو در بهره‌گیری از فناوری‌های نوظهور نظیر نیمه‌هادی‌های با شکاف باند وسیع[۸] (WBG) و طراحی سیستم‌های روی تراشه[۹] (SoC) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش می‌کوشد تا نشان دهد که چگونه نوآوری در سطح ترانزیستور و طراحی تراشه، مستقیماً به ارتقای کارایی و پایداری کل شبکه قدرت هوشمند منجر می‌شود.. برجستگی‌های اصلی این مطالعه مروری را می‌توان در سه نکته کلیدی خلاصه کرد:

- پیوند عمیق و اجتناب‌ناپذیر میان سه حوزه کلیدی سیستم‌های قدرت هوشمند، انرژی‌های نو، و مدارهای مجتمع الکترونیک برجسته می‌شود و نشان می‌دهد که پیشرفت در هر یک، وابسته به نوآوری در دیگری است.
- تأکید ویژه بر این نکته که مدارهای مجتمع، صرفاً اجزای مصرفی نیستند، بلکه هسته‌ی پردازشی و کنترلی شبکه‌های قدرت هوشمند مدرن محسوب می‌شوند و قابلیت‌های آن‌ها مستقیماً بر عملکرد، پایداری و هوشمندی شبکه تأثیر می‌گذارد.
- مطالعه علاوه بر بیان دستاوردها، نگاهی واقع‌بینانه به چالش‌های فنی و امنیتی پیش رو داشته و در عین حال، مسیر آینده را با معرفی فناوری‌های نوظهور ترسیم می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

سازمان‌دهی مطالب این مقاله به‌گونه‌ای است که تعامل میان لایه‌های مختلف سخت‌افزار الکترونیکی و زیرساخت‌های سیستم قدرت را به تصویر بکشد. پس از مقدمه، مقاله در قالب این بخش‌ها تدوین شده است. در بخش ۲، مفاهیم پایه و تعاریف مورد نیاز شامل ویژگی‌های سیستم‌های قدرت هوشمند، منابع انرژی نو و نقش بنیادی مدارهای مجتمع در معماری‌های جدید تبیین می‌گردد. در بخش ۳، نقش کاربردی مدارهای مجتمع در اجزای اصلی شبکه هوشمند، از جمله سامانه‌های اندازه‌گیری هوشمند، مبدل‌های الکترونیک قدرت، تجهیزات حفاظتی و بسترهای ارتباطی بررسی می‌شود. در بخش ۴، به‌طور خاص به چالش‌های یکپارچه‌سازی در سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله فتوولتائیک، نیروگاه‌های بادی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) پرداخته خواهد شد. در بخش ۵، مزایای فنی و اقتصادی بهره‌گیری از این فناوری‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس چالش‌های عملیاتی پیش‌رو، شامل نویز الکترومغناطیسی، محدودیت‌های حرارتی، امنیت سخت‌افزاری و قابلیت‌اطمینان بلندمدت تحلیل می‌شود. در بخش ۶، به روندهای آتی و فناوری‌های نوظهور نظیر ادوات نیمه‌هادی با شکاف باند پهن و معماری‌های روی تراشه هوشمند پرداخته می‌شود. در نهایت، بخش ۷ به جمع‌بندی کلی و ارائه چشم‌اندازی از تأثیر آینده‌ی مدارهای مجتمع بر توسعه پایدار شبکه‌های قدرت اختصاص یافته است.

۲- مفاهیم پایه

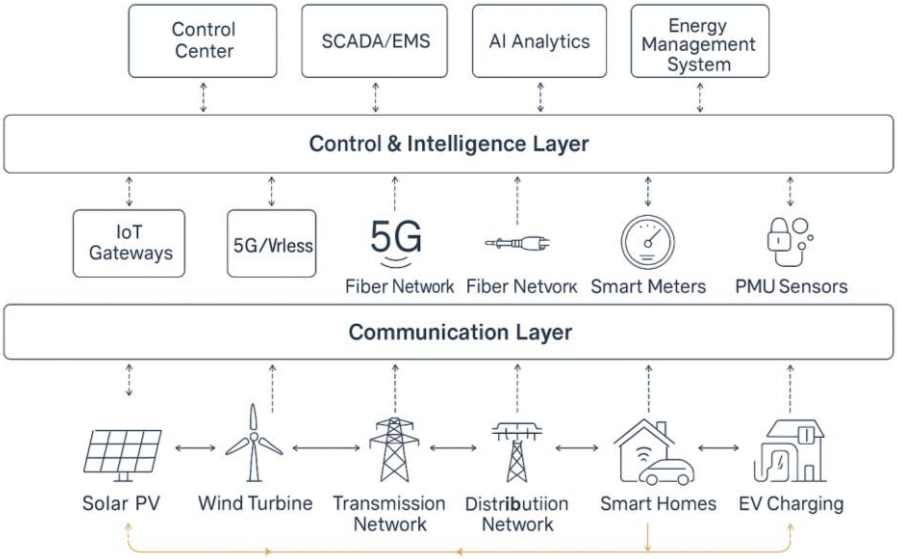
در این بخش، مفاهیم پایه و اصطلاحات اصلی مرتبط با موضوع مقاله تشریح می‌شوند تا چارچوب نظری لازم برای درک نقش مدارهای مجتمع الکترونیک در سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو فراهم شود. از آنجا که این حوزه حاصل همگرایی چند فناوری کلیدی شامل شبکه‌های هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر، الکترونیک قدرت، سامانه‌های کنترلی و مدارهای مجتمع است، شناخت دقیق هر یک از این مفاهیم برای تحلیل کاربردها، مزایا و چالش‌های آن ضروری است. بنابراین، ابتدا مفهوم سیستم قدرت هوشمند و ویژگی‌های آن بیان می‌شود، سپس منابع انرژی نو و الزامات اتصال آن‌ها به شبکه بررسی شده و در ادامه، جایگاه مدارهای مجتمع الکترونیک به‌عنوان زیرساخت سخت‌افزاری پردازش، کنترل، اندازه‌گیری و تبادل داده در این سامانه‌ها توضیح داده می‌شود.

۲-۱- سیستم‌های قدرت هوشمند

سیستم قدرت هوشمند به شبکه‌ای گفته می‌شود که در آن جریان انرژی و اطلاعات به‌صورت دوسویه برقرار بوده و اجزای مختلف آن شامل تولید، انتقال، توزیع و مصرف با بهره‌گیری از حسگرها، کنترل‌کننده‌ها، تجهیزات ارتباطی و نرم‌افزارهای تحلیلی به‌صورت هوشمند مدیریت می‌شوند. از ویژگی‌های اصلی این شبکه‌ها می‌توان به خودترمیمی، انعطاف‌پذیری، قابلیت پایش بلادرنگ، پاسخ‌گویی بار، و یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده اشاره کرد [۲۸،۲۹].

شکل (۱) معماری کلی شبکه هوشمند را نشان می‌دهد که معمولاً از چند لایه اصلی شامل لایه توان[۱۰]، لایه ارتباطات[۱۱]، لایه کنترل و لایه مدیریت[۱۲] تشکیل شده است [۳۰،۳۱]. در لایه قدرت، اجزای فیزیکی سیستم قدرت مانند نیروگاه‌ها، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، خطوط انتقال و توزیع و مصرف‌کنندگان قرار دارند. این لایه مسئول تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در شبکه است. لایه ارتباطات وظیفه تبادل داده و اطلاعات میان اجزای مختلف شبکه را بر عهده دارد. این لایه با استفاده از فناوری‌های ارتباطی مختلف نظیر شبکه‌های بی‌سیم، فیبر نوری و پروتکل‌های ارتباطی پیشرفته، امکان انتقال بلادرنگ اطلاعات مربوط به وضعیت شبکه، توان مصرفی و تولید انرژی را فراهم می‌کند. در لایه کنترل و مدیریت، سیستم‌های نظارتی و کنترلی پیشرفته مانند سامانه‌های مدیریت انرژی، سیستم‌های کنترل توزیع و الگوریتم‌های هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این لایه با تحلیل داده‌های دریافت‌شده از لایه ارتباطات، تصمیمات کنترلی لازم را برای بهبود بهره‌وری، افزایش قابلیت‌اطمینان و حفظ پایداری شبکه اتخاذ می‌کند. تعامل هماهنگ میان این لایه‌ها موجب شکل‌گیری شبکه‌ای هوشمند، انعطاف‌پذیر و کارآمد در مدیریت منابع انرژی و پاسخگویی به نیازهای مصرف‌کنندگان می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۱): معماری مفهومی شبکه هوشمند شامل لایه‌های اصلی سیستم قدرت، ارتباطات و کنترل که تبادل اطلاعات و مدیریت هوشمند انرژی را در شبکه‌های قدرت مدرن امکان‌پذیر می‌سازد.

Figure (1): Conceptual architecture of a smart grid illustrating the main layers of the system including the power layer, communication layer, and control layer that enable bidirectional power and information flow in modern power networks.

۲-۲- انرژی‌های نو

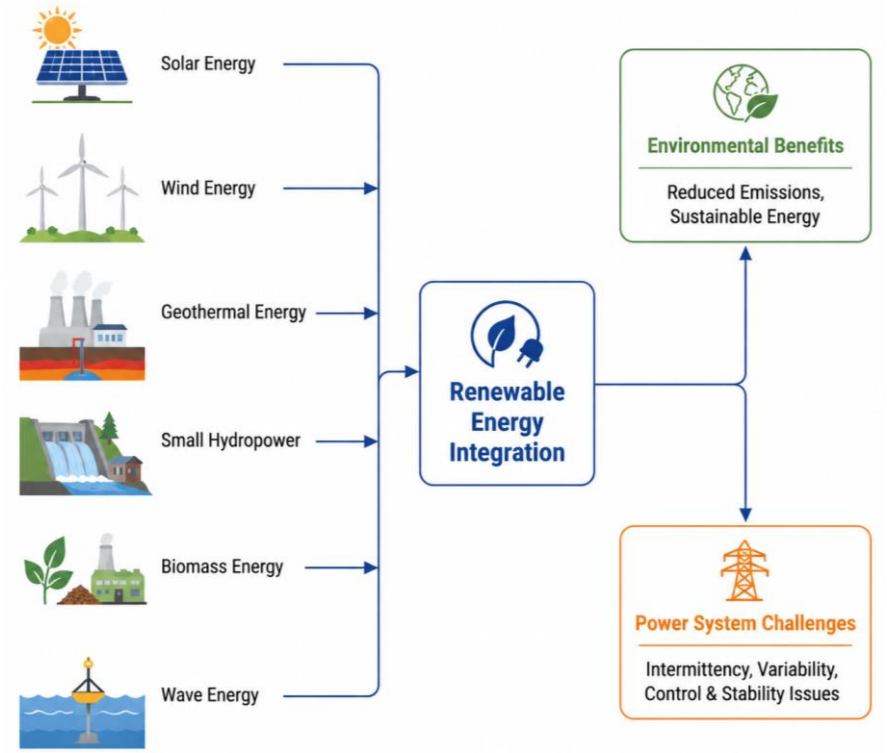
انرژی‌های نو یا تجدیدپذیر، که از منابع طبیعی تجدیدشونده بهره می‌برند، نقشی کلیدی در گذار به سوی یک سیستم انرژی پایدار و کم‌کربن ایفا می‌کنند. این منابع شامل طیف گسترده‌ای از گزینه‌ها هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: انرژی خورشیدی[۱۳] [۳۲،۳۳]، انرژی بادی[۱۴] [۳۴،۳۵]، انرژی زمین‌گرمایی[۱۵] [۳۶،۳۷]، برق‌آبی کوچک[۱۶] [۳۸،۳۹]، زیست‌توده[۱۷] [۴۰،۴۱]، انرژی امواج[۱۸] [۴۲،۴۳] و جزر و مد[۱۹] [۴۴،۴۵]. این منابع تجدیدپذیر مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی دارند، به‌ویژه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی. با این حال، ماهیت ذاتی آن‌ها، یعنی متناوب[۲۰] و تغییرپذیری[۲۱]، چالش‌های قابل توجهی را برای سیستم‌های قدرت سنتی ایجاد می‌کند. این نوسانات در تولید، هماهنگی عرضه و تقاضا، حفظ پایداری شبکه و اطمینان از قابلیت‌اطمینان سیستم را دشوار می‌سازد. بنابراین، توسعه فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت این چالش‌ها، از جمله سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و کنترل هوشمند، امری ضروری است.

شکل (۲) نمایی مفهومی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر را نشان می‌دهد که شامل انرژی خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، برق‌آبی کوچک، زیست‌توده و انرژی امواج است. این منابع به دلیل تأمین انرژی از فرآیندهای طبیعی و قابلیت تجدید مداوم، نقش مهمی در کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند و به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه سیستم‌های انرژی پایدار شناخته می‌شوند. با این حال، تولید توان در بسیاری از این منابع به شرایط محیطی وابسته است و به صورت متناوب و متغیر رخ می‌دهد. این ویژگی باعث ایجاد عدم قطعیت در تولید انرژی و بروز چالش‌هایی در بهره‌برداری، کنترل و حفظ پایداری سیستم قدرت می‌شود. بنابراین، ادغام مؤثر منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت نیازمند استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های هوشمند در مدیریت شبکه است.

۲-۳- مدارهای مجتمع الکترونیک

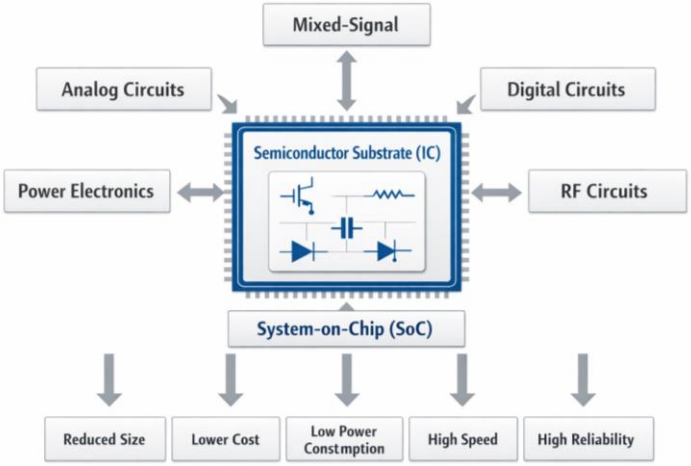
مدار مجتمع الکترونیک مجموعه‌ای از اجزای الکترونیکی نظیر ترانزیستورها، مقاومت‌ها، خازن‌ها و دیودها است که بر روی یک بستر نیمه‌هادی مجتمع می‌شوند. این مدارها می‌توانند در قالب مدارات آنالوگ، دیجیتال، ترکیبی، توان، فرکانس رادیویی[۲۲] (RF) و سامانه‌های روی تراشه طراحی شوند. استفاده از مدارهای مجتمع باعث کاهش ابعاد، هزینه، مصرف توان، و افزایش سرعت و قابلیت‌اطمینان سامانه‌ها می‌شود [۴۶-۴۹].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۲): نمایش مفهومی انواع منابع انرژی تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، برق‌آبی کوچک، زیست‌توده و انرژی امواج و همچنین تأثیر آن‌ها بر سیستم قدرت. این منابع با وجود مزایای زیست‌محیطی، به دلیل ماهیت متناوب و متغیر خود، چالش‌هایی در کنترل و پایداری شبکه ایجاد می‌کنند.

Figure (2): Conceptual illustration of major renewable energy sources including solar, wind, geothermal, small hydropower, biomass, and wave energy, along with their impacts on power systems. Despite their environmental benefits, the intermittent and variable nature of these resources introduces challenges for power system control and stability.



شکل (۳): ساختار مفهومی یک مدار مجتمع الکترونیک شامل اجزای اصلی نظیر واحد پردازش، بلوک‌های آنالوگ و دیجیتال، رابط‌های ورودی/خروجی و مدارهای مدیریت توان که بر روی یک تراشه نیمه‌هادی یکپارچه شده‌اند.

Figure (3): Conceptual architecture of an electronic integrated circuit (IC) including processing unit, analog and digital blocks, input/output interfaces, and power management circuits integrated on a single semiconductor chip.

شکل (۳) ساختار کلی یک مدار مجتمع الکترونیک را به صورت مفهومی نشان می‌دهد. در این ساختار، اجزای مختلفی نظیر بلوک‌های آنالوگ، بخش‌های دیجیتال، واحد پردازش مرکزی، مدارهای مدیریت توان و رابط‌های ورودی/خروجی در قالب یک تراشه نیمه‌هادی مجتمع شده‌اند. این یکپارچگی موجب کاهش ابعاد فیزیکی، افزایش سرعت پردازش، کاهش مصرف توان و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

افزایش قابلیت‌اطمینان سیستم‌های الکترونیکی می‌شود. در کاربردهای مرتبط با سیستم‌های قدرت هوشمند و انرژی‌های نو، مدارهای مجتمع نقش مهمی در انجام وظایفی نظیر پردازش داده‌های حسگرها، اجرای الگوریتم‌های کنترلی، مدیریت توان و برقراری ارتباط میان اجزای مختلف شبکه ایفا می‌کنند. به همین دلیل، توسعه مدارهای مجتمع پیشرفته یکی از عوامل کلیدی در ارتقای عملکرد، هوشمندی و پایداری سیستم‌های قدرت مدرن محسوب می‌شود.

۳- نقش مدارهای مجتمع الکترونیک در سیستم‌های قدرت هوشمند

در سیستم‌های قدرت هوشمند، مدارهای مجتمع الکترونیک نقش زیرساختی و تعیین‌کننده‌ای در تحقق قابلیت‌هایی مانند پایش بلادرنگ، کنترل پیشرفته، حفاظت هوشمند، مدیریت انرژی و تبادل داده ایفا می‌کنند. این مدارها با فراهم‌سازی امکان پردازش سریع سیگنال‌ها، اندازه‌گیری دقیق پارامترهای الکتریکی، کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت و ارتباط مطمئن میان اجزای مختلف شبکه، به‌عنوان هسته سخت‌افزاری تجهیزات هوشمند عمل می‌کنند. ازاین‌رو، توسعه شبکه‌های قدرت مدرن، منابع انرژی تجدیدپذیر، ریزشبکه‌ها و سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی تا حد زیادی به پیشرفت و به‌کارگیری مدارهای مجتمع وابسته است. در این بخش، نقش مدارهای مجتمع در مهم‌ترین عملکردهای سیستم‌های قدرت هوشمند، از جمله اندازه‌گیری و پایش، کنترل، حفاظت، مدیریت انرژی و ارتباطات داده بررسی می‌شود [۵۰،۵۱].

۳-۱- اندازه‌گیری و پایش هوشمند

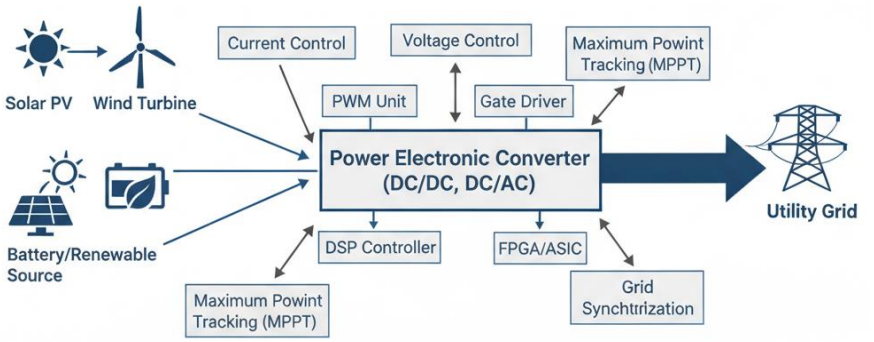
در شبکه‌های قدرت هوشمند، اندازه‌گیری دقیق پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، توان، فرکانس، ضریب توان و کیفیت توان ضروری است. مدارهای مجتمع در طراحی کنتورهای هوشمند، حسگرهای جریان و ولتاژ، واحدهای اندازه‌گیری فازور[۲۳] (PMU) و تجهیزات مانیتورینگ نقش اساسی دارند. این تراشه‌ها با فراهم کردن قابلیت‌های کلیدی مانند نمونه‌برداری سریع[۲۴]، تبدیل آنالوگ به دیجیتال (ADC) با دقت بالا، فیلترسازی دیجیتال[۲۵] برای حذف نویز، پردازش سیگنال دیجیتال (DSP) برای محاسبه پارامترهای پیچیده، و واسط‌های ارتباطی[۲۶] برای ارسال داده‌ها، زیرساخت لازم برای تحقق اهداف شبکه‌های قدرت هوشمند را فراهم می‌آورند. این قابلیت‌ها امکان تصمیم‌گیری‌های سریع و مبتنی بر داده را برای اپراتورهای شبکه و سیستم‌های کنترلی خودکار فراهم کرده و به افزایش کارایی، قابلیت‌اطمینان و انعطاف‌پذیری شبکه کمک شایانی می‌کنند [۵۲،۵۳].

۳-۲- کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت

اتصال منابع انرژی نو به شبکه عمدتاً از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت صورت می‌گیرد [۵۴،۵۵]. عملکرد این مبدل‌ها به کنترل‌کننده‌های دقیق و سریع وابسته است. مدارهای مجتمع در واحدهای PWM، درایورهای گیت، کنترل‌کننده‌های DSP، آرایه گیت قابل برنامه ریزی[۲۷] (FPGA) و مدار مجتمع با کاربرد خاص[۲۸] (ASIC) استفاده می‌شوند تا کنترل جریان، کنترل ولتاژ، دنبال‌سازی نقطه حداکثر توان و سنکرون‌سازی شبکه را انجام دهند.

شکل (۴) نشان می‌دهد که اتصال منابع انرژی نو به شبکه بدون استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت عملاً امکان‌پذیر نیست. این مبدل‌ها به عنوان واسط اصلی میان منبع تولید و شبکه برق عمل کرده و کیفیت، پایداری و قابلیت کنترل توان تزریقی را تعیین می‌کنند. برای تحقق عملکرد دقیق این مبدل‌ها، از مدارهای مجتمع در بخش‌های مختلف کنترلی و اجرایی استفاده می‌شود. به‌طور خاص، واحدهای PWM برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی، درایورهای گیت برای تحریک عناصر نیمه‌هادی قدرت، و پردازنده‌های DSP، FPGA و ASIC برای اجرای الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته به‌کار می‌روند. این زیرسیستم‌ها وظایفی مانند کنترل جریان و ولتاژ، دنبال‌سازی نقطه حداکثر توان و سنکرون‌سازی با شبکه را انجام می‌دهند. در نتیجه، مدارهای مجتمع نقش کلیدی در افزایش سرعت پاسخ، دقت کنترلی، بازده و قابلیت‌اطمینان سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های نو دارند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



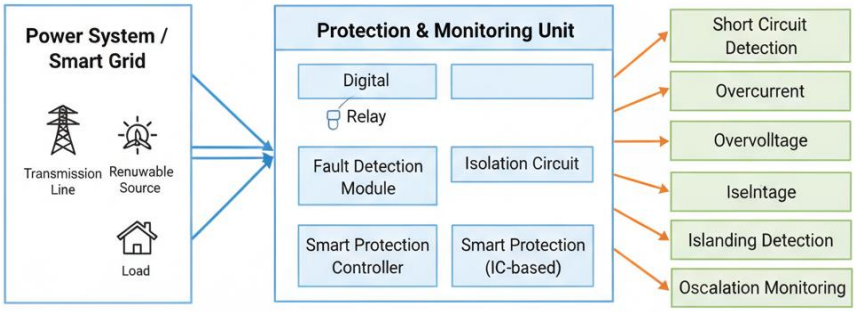
شکل (۴): نقش مبدل‌های الکترونیک قدرت و مدارهای مجتمع در اتصال منابع انرژی نو به شبکه، شامل واحدهای مدولاسیون پهنای پالس، درایورهای گیت، کنترل‌کننده‌های DSP/FPGA/ASIC و عملکردهای کنترلی مانند کنترل جریان، کنترل ولتاژ، MPPT و سنکرون‌سازی با شبکه.

Figure (4): Role of power electronic converters and integrated circuits in interfacing renewable energy sources with the grid, including PWM units, gate drivers, DSP/FPGA/ASIC controllers, and control functions such as current control, voltage control, MPPT, and grid synchronization.

۳-۳- حفاظت و تشخیص خطا

سیستم‌های قدرت هوشمند نیازمند حفاظت تطبیقی و سریع هستند. مدارهای مجتمع در رله‌های دیجیتال، آشکارسازهای خطا، مدارات ایزولاسیون و تجهیزات حفاظتی هوشمند به‌کار می‌روند. این سامانه‌ها می‌توانند خطاهای اتصال کوتاه، اضافه‌جریان، اضافه‌ولتاژ، جزیره‌ای شدن و نوسانات نامطلوب را شناسایی و مدیریت کنند [۵۶،۵۷].

شکل (۵) نشان می‌دهد که در شبکه‌های قدرت هوشمند، حفاظت و تشخیص خطا یکی از مهم‌ترین وظایف سامانه‌های کنترلی و سخت‌افزاری است. به دلیل پیچیدگی ساختار شبکه، حضور منابع تجدیدپذیر و ماهیت دوطرفه جریان توان، استفاده از روش‌های حفاظتی سنتی به‌تنهایی کافی نیست و نیاز به حفاظت تطبیقی و سریع وجود دارد. مدارهای مجتمع در این میان نقش کلیدی دارند، زیرا امکان پیاده‌سازی رله‌های دیجیتال، آشکارسازهای خطا، مدارهای ایزولاسیون و تجهیزات حفاظتی هوشمند را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها می‌توانند انواع خطاها از جمله اتصال کوتاه، اضافه‌جریان، اضافه‌ولتاژ، جزیره‌ای شدن و نوسانات نامطلوب را در زمان بسیار کوتاه شناسایی کرده و واکنش مناسب حفاظتی را اعمال کنند. در نتیجه، استفاده از ICهای پیشرفته موجب افزایش سرعت واکنش، دقت تشخیص و قابلیت‌اطمینان حفاظت در سیستم‌های قدرت هوشمند می‌شود.



شکل (۵): نقش مدارهای مجتمع در سامانه‌های حفاظت و تشخیص خطا در شبکه‌های قدرت هوشمند، شامل رله‌های دیجیتال، آشکارسازهای خطا، مدارهای ایزولاسیون و تجهیزات حفاظتی هوشمند برای شناسایی و مدیریت خطاهایی مانند اتصال کوتاه، اضافه‌جریان، اضافه‌ولتاژ، جزیره‌ای شدن و نوسانات نامطلوب.

Figure (5): Role of integrated circuits in protection and fault detection systems of smart grids, including digital relays, fault detectors, isolation circuits, and smart protective devices for identifying and managing faults such as short circuits, overcurrent, overvoltage, islanding, and undesirable fluctuations.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]

۴-۳- مدیریت انرژی و تصمیم‌گیری هوشمند

در شبکه‌های قدرت هوشمند، سیستم‌های مدیریت انرژی[۲۹] (EMSs) به عنوان مغز متفکر شبکه عمل می‌کنند [۵۸،۵۹]. وظیفه اصلی این سامانه‌ها، هماهنگ‌سازی پویا و بهینه میان تولیدات متغیر مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ذخیره انرژی[۳۰] (ESS) و بارهای مصرفی است. با توجه به ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی منابع انرژی نو، مدیریت هوشمند انرژی برای تضمین پایداری شبکه و افزایش بهره‌وری، به جایگاه بی‌بدیلی دست یافته است [۶۰،۶۱].

الف- زیرساخت سخت‌افزاری و پیاده‌سازی تعبیه‌شده: پیاده‌سازی مؤثر سیستم‌های مدیریت انرژی در ابعاد وسیع، وابستگی شدیدی به پیشرفت‌های اخیر در حوزه مدارهای مجتمع (IC) و معماری‌های تعبیه‌شده دارد. این سامانه‌ها از معماری چندسطحی بهره می‌برند که اجزای اصلی آن عبارتند از:

- ریزکنترل‌گرها[۳۱] و پردازنده‌های تعبیه‌شده[۳۲] : این تراشه‌ها به عنوان هسته اصلی پردازش داده‌ها، وظیفه جمع‌آوری اطلاعات حسگرها، اجرای الگوریتم‌های پیچیده بهینه‌سازی و تولید فرامین کنترلی را بر عهده دارند.

- تراشه‌های ارتباطی[۳۳]: برای برقراری ارتباط پایدار میان زیرسیستم‌ها از تراشه‌های ارتباطی پیشرفته با قابلیت پشتیبانی از پروتکل‌های مختلف استفاده می‌شود.

-مدارات واسط[۳۴]: مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال دقیق و مدارهای شرطی‌ساز سیگنال، ارتباط میان دنیای فیزیکی (ولتاژ و جریان شبکه) و دنیای دیجیتال پردازنده را برقرار می‌کنند.

ب- پردازش داده و اجرای الگوریتم‌های کنترلی: مدارهای مجتمع پیشرفته، با قدرت محاسباتی بالا، امکان اجرای وظایف سنگین پردازشی را در لبه شبکه[۳۵] فراهم می‌آورند [۶۴-۶۲]. این تراشه‌ها وظایف زیر را مدیریت می‌کنند:

- پیش‌بینی تولید و بار: اجرای الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی توان خروجی منابع تجدیدپذیر و الگوهای مصرف انرژی.

- تصمیم‌گیری هوشمند: اتخاذ تصمیمات بلادرنگ برای شارژ/دشارژ بهینه باتری‌ها، جابه‌جایی بارهای غیرحیاتی و پاسخگویی به تقاضا[۳۶] به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش طول عمر تجهیزات.

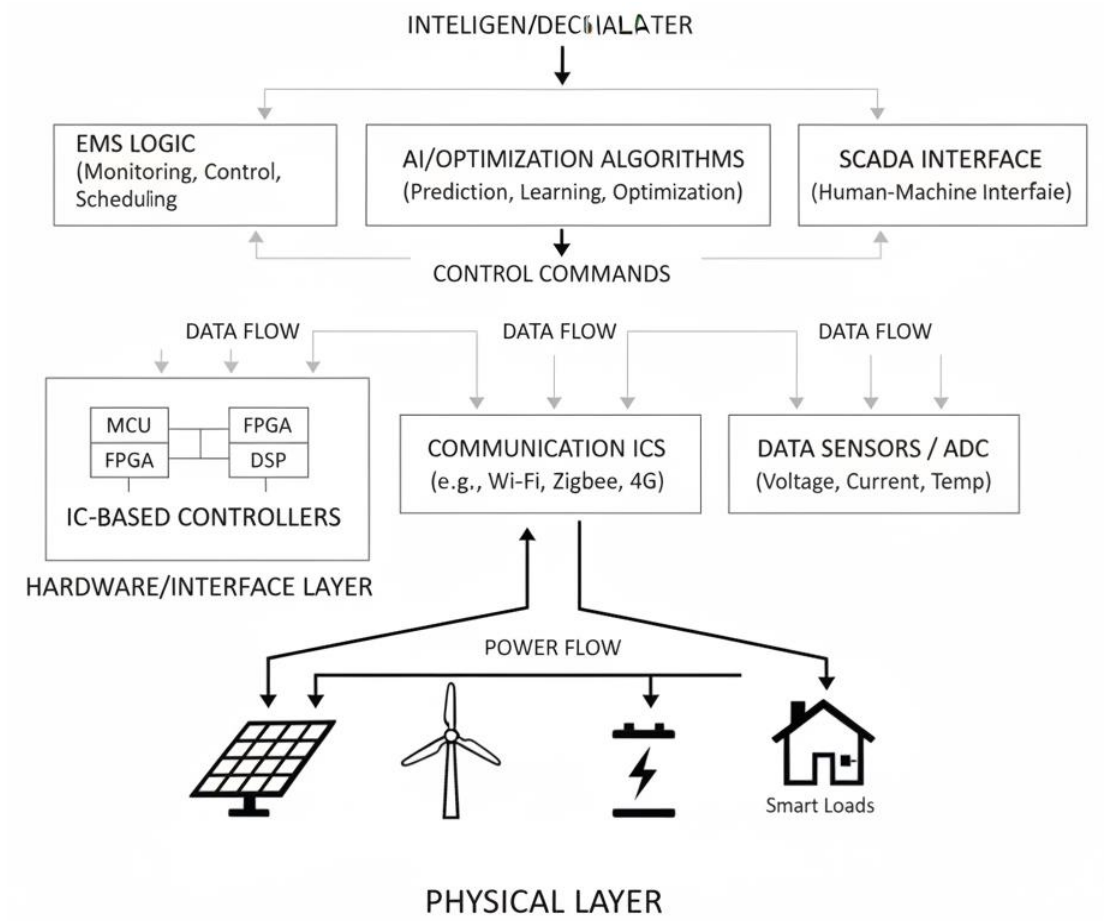
- تبادل اطلاعات سلسله‌مراتبی: مدارهای مجتمع با پشتیبانی از استانداردهای ارتباطی، داده‌های استخراج‌شده را به سطوح بالاتر شبکه مانند سیستم‌های جمع‌آوری داده و کنترل نظارتی[۳۷] (اسکادا) ارسال کرده و فرامین کنترلی را در سطوح پایین‌تر اجرا می‌کنند.

در نهایت، ادغام این سخت‌افزارهای یکپارچه در سیستم‌های مدیریت انرژی، تحولی بنیادین در بهره‌برداری از منابع انرژی ایجاد کرده است. استفاده از مدارهای مجتمع تخصصی نه‌تنها باعث کاهش تاخیر در پاسخ‌دهی و افزایش دقت محاسبات می‌شود، بلکه با کوچک‌سازی ابعاد تجهیزات و کاهش مصرف توان عملیاتی، راه را برای استقرار سیستم‌های هوشمند در مقیاس‌های گسترده هموار می‌سازد.

شکل (۶) ساختار کلی یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند را نشان می‌دهد که در آن منابع تجدیدپذیر، واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و بارهای مصرفی تحت یک چارچوب کنترلی یکپارچه مدیریت می‌شوند. در این ساختار، مدارهای مجتمع نقش کلیدی در جمع‌آوری داده‌ها، پردازش اطلاعات، اجرای الگوریتم‌های کنترلی و تبادل اطلاعات با سطوح بالاتر شبکه ایفا می‌کنند. استفاده از ریزکنترل‌گرها، پردازنده‌های تعبیه‌شده و تراشه‌های ارتباطی، امکان تصمیم‌گیری بلادرنگ، پیش‌بینی رفتار سیستم و بهینه‌سازی جریان توان را فراهم می‌سازد. در نتیجه، این معماری موجب افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات، بهبود پاسخگویی شبکه و ارتقای پایداری در بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر می‌شود.

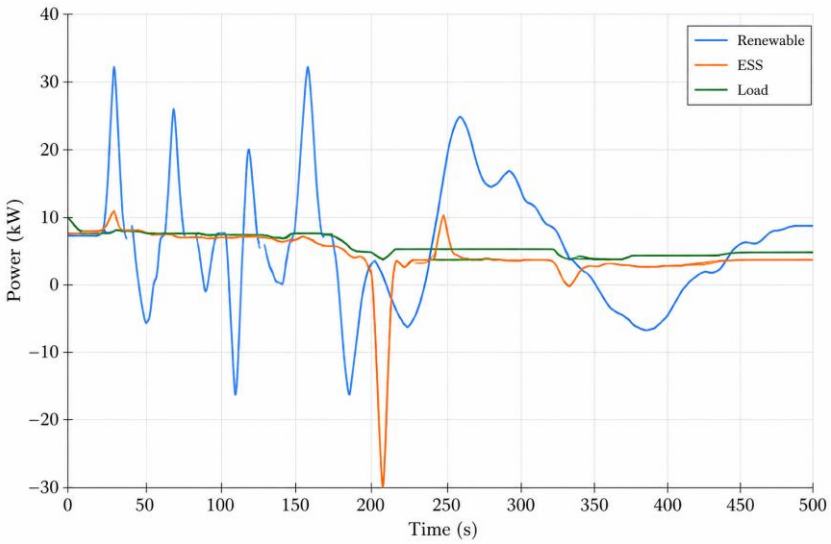
همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، تراز توان در میکروگرید تحت شرایط تغییرپذیر تولید و مصرف مورد بررسی قرار گرفته است. نوسانات توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، ناشی از تغییرات شرایط محیطی مانند شدت تابش خورشید یا سرعت باد است. در چنین شرایطی، واحد ذخیره‌ساز انرژی با جذب توان اضافی در زمان مازاد تولید و تزریق انرژی در زمان کاهش تولید، نقش مهمی در متعادل‌سازی توان ایفا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استراتژی مدیریت انرژی قادر است با تنظیم توان ذخیره‌ساز، تعادل میان تولید و مصرف را حفظ کرده و از بروز نوسانات شدید در شبکه جلوگیری نماید.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۶): معماری مفهومی سیستم مدیریت انرژی و تصمیم‌گیری هوشمند در شبکه‌های قدرت هوشمند، شامل منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازهای انرژی، بارهای مصرفی، مدارهای مجتمع پردازشی، تراشه‌های ارتباطی و لایه تصمیم‌گیری بلادرنگ.

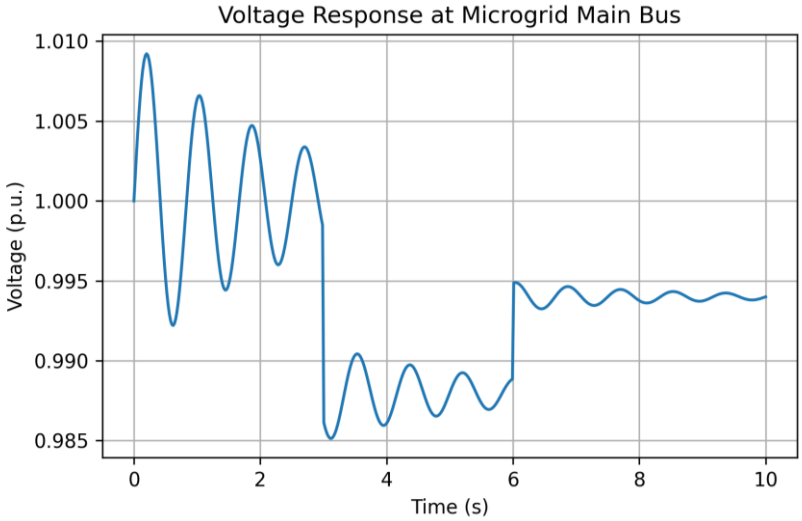
Figure (6): Conceptual architecture of the energy management and smart decision-making system in smart power grids, including renewable resources, energy storage devices, consumer loads, integrated processing circuits, communication chips, and real-time decision-making layer.



شکل (۷): شبیه‌سازی تراز توان در میکروگرید شامل توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، توان ذخیره‌سازی در واحد سیستم ذخیره‌ساز انرژی و توان مصرفی بار در طول زمان.

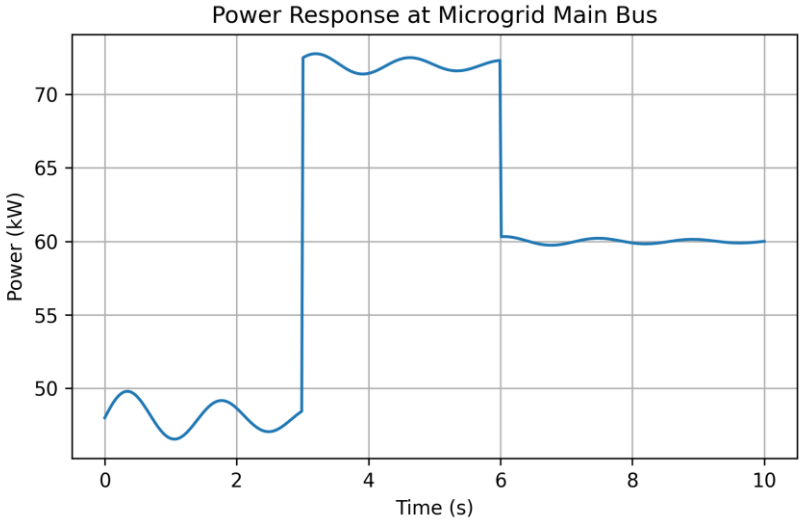
Figure (7): Simulation of the power balance in the microgrid, including the generated power of renewable resources, the storage power in the energy storage system unit, and the load's consumed power over time.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۸): پاسخ ولتاژ باس اصلی میکروگرید در شرایط تغییرپذیر بهره‌برداری و تغییرات ناگهانی بار.

Figure (8): Voltage response of the main microgrid bus under variable operating conditions and load disturbances.



شکل (۹): شبیه‌سازی تراز توان در میکروگرید شامل توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، توان ذخیره‌سازی در واحد سیستم ذخیره‌ساز انرژی و توان مصرفی بار در طول زمان.

Figure (9): Simulation of the power balance in the microgrid, including the generated power of renewable resources, the storage power in the energy storage system unit, and the load's consumed power over time.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با اعمال تغییرات پله‌ای در بار، ولتاژ باس اصلی دچار انحراف لحظه‌ای می‌شود، اما سیستم کنترل مبتنی بر مدارهای مجتمع دیجیتال با زمان پاسخ سریع، ولتاژ را در مدت کوتاهی به مقدار نامی بازمی‌گرداند. نوسانات اولیه محدود بوده و دامنه اُورشوت در محدوده مجاز استانداردهای بهره‌برداری شبکه (٪۵±) باقی می‌ماند. این عملکرد نشان‌دهنده: سرعت پردازش بالای کنترل‌کننده دیجیتال، دقت نمونه‌برداری و تنظیم حلقه کنترلی و پایداری مناسب سیستم در برابر اغتشاشات بار می‌باشد. بنابراین، استفاده از کنترلرهای مبتنی بر IC موجب بهبود شاخص‌های کیفیت توان و پایداری ولتاژ در میکروگرید شده است.

در شکل (۹)، تغییرات توان اکتیو باس اصلی در مواجهه با تغییرات بار نمایش داده شده است. با وقوع افزایش بار، توان تزریقی منابع تولیدی (PV، بادی و ذخیره‌ساز) افزایش یافته و تعادل توان در سیستم برقرار می‌شود. سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر IC با اجرای الگوریتم‌های کنترلی دیجیتال: بازتوزیع سریع توان بین منابع، کاهش نوسانات گذرا و جلوگیری از عدم تعادل تولید و مصرف را امکان‌پذیر ساخته است. پاسخ نرم و بدون نوسان شدید نشان‌دهنده عملکرد مناسب حلقه کنترل توان و هماهنگی بین مبدل‌های الکترونیک قدرت است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، ادغام مدارهای مجتمع پیشرفته در سیستم‌های مدیریت انرژی منجر به جهشی قابل‌توجه در معیارهای عملکردی شده است. بهبود ده برابری در زمان پاسخ‌دهی (از سطح ۵۰ میلی‌ثانیه به زیر ۱۰ میلی‌ثانیه)، امکان کنترل دقیق‌تر منابع متغیر تجدیدپذیر را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، در حالی که روش‌های سنتی به دلیل ماهیت سخت‌افزاری خود در برابر تغییرات محیطی انعطاف‌پذیری کمی دارند، سیستم پیشنهادی مبتنی بر IC با قابلیت برنامه‌پذیری بالا، به سادگی می‌تواند الگوریتم‌های پیچیده بهینه‌سازی (نظیر کنترل پیش‌بین مدل‌محور) را اجرا نماید. اگرچه هزینه اولیه پیاده‌سازی تراشه‌های هوشمند ممکن است بیشتر از مدارات ساده آنالوگ باشد، اما در دیدگاه کلان، این افزایش هزینه با کاهش تلفات انرژی، افزایش طول عمر تجهیزات و بهبود پایداری شبکه به‌طور کامل توجیه می‌گردد.

Table (1): Performance comparison of integrated circuit-based intelligent control system with traditional analog approaches in microgrid management.

جدول (۱): مقایسه عملکردی سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر مدارهای مجتمع با رویکردهای آنالوگ سنتی در مدیریت ریزشبکه‌ها.

بهبود حاصله	کنترل دیجیتال مبتنی بر مدار مجتمع	کنترل آنالوگ سنتی	شاخص ارزیابی
بالا	۵ الی ۱۰ میلی‌ثانیه	۵۰ الی ۱۰۰ میلی‌ثانیه	زمان پاسخ‌دهی
عالی	بسیار بالا	متوسط (وابسته به قطعات)	دقت تنظیم پارامترها
بسیار بالا	بسیار بالا (برنامه‌پذیر)	پایین (نیاز به سخت‌افزار ثابت)	انعطاف‌پذیری
-	متوسط (بهینه در مقیاس بالا)	پایین (در مقیاس کم)	هزینه پیاده‌سازی
بسیار زیاد	بالا	محدود (تک‌حلقه)	پیچیدگی الگوریتم‌ها
بالا	بالا (حفاظت درونی)	متوسط (فرسودگی قطعات)	قابلیت اطمینان

۵-۳- ارتباطات و تبادل داده

در سیستم‌های قدرت هوشمند، ارتباطات مطمئن و سریع اهمیت فراوانی دارد. تراشه‌های مخابراتی برای ارتباطات سیمی و بی‌سیم، بخش مهمی از معماری شبکه هوشمند را تشکیل می‌دهند [۶۵،۶۶]. این مدارها داده‌های مربوط به مصرف، تولید، وضعیت تجهیزات و هشدارهای حفاظتی را بین اجزای مختلف شبکه منتقل می‌کنند. در معماری شبکه‌های قدرت هوشمند، لایه ارتباطات به عنوان ستون فقرات تبادل اطلاعات شناخته می‌شود. گذار از شبکه‌های سنتی به شبکه‌های هوشمند نیازمند زیرساخت‌های ارتباطی است که بتوانند داده‌های حجیم را با تأخیر بسیار کم[۳۸]، قابلیت‌اطمینان[۳۹] بالا و امنیت تضمین‌شده منتقل کنند. مدارهای مجتمع با فراهم کردن قابلیت‌های پردازش سیگنال و مخابراتی در ابعاد بسیار کوچک، بستر فنی لازم برای این لایه را ایجاد کرده‌اند [۶۷،۶۸].

الف- تنوع فناوری‌های ارتباطی و نقش تراشه‌ها: سیستم‌های قدرت هوشمند برای پوشش‌دهی سطوح مختلف شبکه (از سطح انتقال فشار قوی تا سطح مصرف‌کننده نهایی)، از ترکیبی از فناوری‌های سیمی و بی‌سیم استفاده می‌کنند. مدارهای مجتمع مخابراتی قلب این فناوری‌ها هستند.

ب- طبقه‌بندی و مدیریت جریان داده: مدارهای مجتمع مخابراتی وظیفه دارند انواع داده‌های شبکه را بر اساس اولویت‌بندی مدیریت کنند.

ج- یکپارچگی و امنیت: فناوری‌های نوین به سمت استفاده از تراشه‌های روی سیسم حرکت کرده‌اند که هم‌زمان پروتکل‌های ارتباطی، قابلیت‌های پردازشی و الگوریتم‌های رمزنگاری را در یک تراشه مجتمع می‌کنند. این رویکرد نه‌تنها هزینه پیاده‌سازی و فضای اشغال‌شده توسط تجهیزات را کاهش می‌دهد، بلکه با استفاده از پروتکل‌های امنیتی سخت‌افزاری از شبکه در برابر حملات سایبری محافظت می‌کند.

بدون وجود این تراشه‌های مخابراتی پیشرفته، تبادل هوشمند داده میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و مراکز کنترل ناممکن بود. هم‌گراییِ سخت‌افزارهای ارتباطی و پردازشی، باعث شده است تا شبکه قدرت از یک موجودیت ایستا و یک‌طرفه، به یک سیستم سایبری-فیزیکی پویا و خودترمیم تبدیل شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

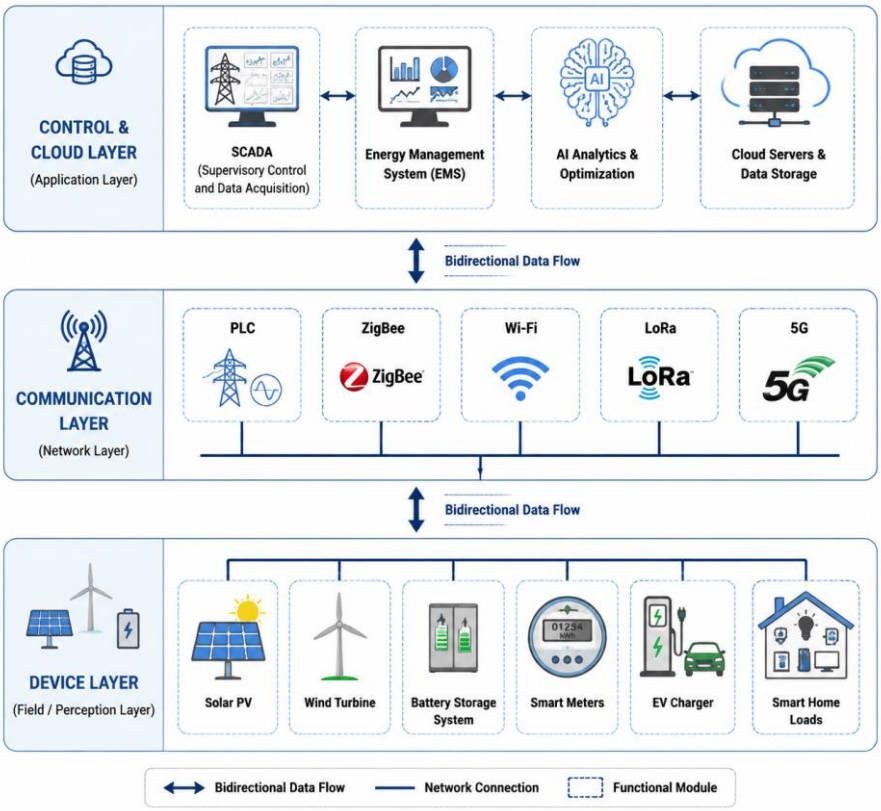
شکل (۱۰) ساختار مفهومی و لایه‌بندی‌شده ارتباطات در یک شبکه هوشمند مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. این معماری از سه لایه اصلی تشکیل شده است: لایه تجهیزات، لایه ارتباطات، و لایه کنترل و ابر. در لایه تجهیزات، اجزای فیزیکی شبکه مانند پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، کنتورهای هوشمند، شارژرهای خودروهای الکتریکی و بارهای هوشمند قرار دارند. این تجهیزات به‌طور پیوسته داده‌هایی نظیر توان تولیدی، وضعیت مصرف، سطح شارژ باتری، کیفیت توان، وضعیت کلیدها و رخدادهای حفاظتی را تولید می‌کنند. لایه ارتباطات به‌عنوان ستون فقرات تبادل داده در شبکه هوشمند عمل می‌کند و وظیفه انتقال اطلاعات میان تجهیزات میدانی و مراکز کنترل را بر عهده دارد. بسته به نوع کاربرد، فاصله ارتباطی، حجم داده، هزینه و الزامات تأخیر زمانی، فناوری‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای نمونه، PLC می‌تواند از خطوط موجود برق برای انتقال داده استفاده کند، ZigBee و Wi- Fi برای شبکه‌های محلی و خانگی مناسب هستند، LoRa برای ارتباطات کم‌مصرف و برد بلند کاربرد دارد و G۵ امکان تبادل داده سریع و بلادرنگ را برای کاربردهای حساس مانند حفاظت، کنترل مبدل‌ها و مدیریت بار فراهم می‌کند [۶۹،۷۰]. در لایه کنترل و ابر، داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط سامانه‌هایی مانند SCADA، سامانه مدیریت انرژی (EMS)، تحلیل‌گرهای مبتنی بر هوش مصنوعی و زیرساخت‌های پردازش ابری تحلیل می‌شوند. این لایه با استفاده از داده‌های دریافتی، تصمیماتی مانند تنظیم توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، کنترل شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، مدیریت بار، تشخیص شرایط غیرعادی، پاسخگویی به تقاضا و بهینه‌سازی بهره‌برداری از شبکه را اتخاذ می‌کند. سپس فرمان‌های کنترلی از طریق همان زیرساخت ارتباطی به تجهیزات میدانی ارسال می‌شوند. چنین معماری‌ای باعث افزایش قابلیت مشاهده‌پذیری، کنترل‌پذیری، انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه‌های قدرت هوشمند می‌شود.

جدول (۲) به مقایسه نقش و ویژگی‌های فناوری‌های مختلف ارتباطی مبتنی بر مدارهای مجتمع در شبکه‌های قدرت هوشمند می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از این فناوری‌ها بسته به نوع کاربرد در لایه‌های مختلف شبکه دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. در بخش فناوری‌های سیمی مبتنی بر مدارهای مجتمع مانند PLC و فیبر نوری، مهم‌ترین مزیت‌ها شامل قابلیت اطمینان بالا، نرخ انتقال داده زیاد و تأخیر بسیار کم است. به همین دلیل این فناوری‌ها عمدتاً در ارتباطات حیاتی شبکه مانند ارتباط میان پست‌های برق، مراکز کنترل و تجهیزات حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، نیاز به زیرساخت فیزیکی و هزینه نصب از جمله محدودیت‌های آن‌ها محسوب می‌شود. در مقابل، فناوری‌های بی‌سیم مبتنی بر تراشه‌های مخابراتی مانند LoRa، WiFi و G5 انعطاف‌پذیری بیشتری در استقرار دارند و برای پوشش گسترده حسگرها، کنتورهای هوشمند و تجهیزات اینترنت اشیای انرژی مناسب هستند. این فناوری‌ها به دلیل عدم نیاز به کابل‌کشی، هزینه نصب کمتری دارند، هرچند ممکن است در برخی شرایط تحت تأثیر تداخل امواج یا محدودیت پهنای باند قرار گیرند. در سال‌های اخیر، روند توسعه به سمت تراشه‌های یکپارچه ارتباطی–پردازشی حرکت کرده است. این تراشه‌ها قابلیت‌های متعددی از جمله پردازش داده، اجرای پروتکل‌های مخابراتی، مدیریت توان و الگوریتم‌های رمزنگاری را به صورت هم‌زمان در یک بستر سخت‌افزاری مجتمع فراهم می‌کنند. چنین رویکردی علاوه بر کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های پیاده‌سازی، امکان پیاده‌سازی مکانیزم‌های امنیتی سخت‌افزاری مانند رمزنگاری داخلی و راه‌اندازی امن را نیز فراهم می‌سازد. در مجموع، ترکیب هوشمندانه این فناوری‌های ارتباطی مبتنی بر مدارهای مجتمع، زیرساخت ارتباطی لازم برای شبکه‌های قدرت هوشمند را فراهم کرده و امکان تبادل سریع، امن و قابل‌اطمینان داده میان اجزای مختلف شبکه را مهیا می‌کند. این قابلیت‌ها نقش مهمی در تبدیل شبکه‌های سنتی به سامانه‌های سایبری–فیزیکی هوشمند، پویا و خودترمیم ایفا می‌کنند.

۴- کاربرد مدارهای مجتمع در سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های نو

در سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های نو، مدارهای مجتمع الکترونیک نقش مهمی در بهبود عملکرد، کنترل‌پذیری و قابلیت-اطمینان منابع تجدیدپذیر ایفا می‌کنند. منابعی مانند سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای انرژی و ریزشبکه‌های تجدیدپذیر به دلیل ماهیت متغیر و وابسته به شرایط محیطی، نیازمند پایش دقیق، پردازش سریع داده‌ها و کنترل بلادرنگ هستند [۷۱،۷۲].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۱۰): معماری سه‌لایه ارتباطات در شبکه هوشمند مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر.

Figure (10): Three-layer communication architecture in a smart grid based on renewable energy sources.

جدول (۲): مقایسه معماری‌های ارتباطی و قابلیت‌های تراشه‌های مخابراتی در شبکه‌های قدرت هوشمند

Table (2): Comparison of communication architectures and capabilities of telecommunication chips in smart power grids

شاخص مقایسه	فناوری‌های سیمی مبتنی بر مدار مجتمع	فناوری‌های بی‌سیم مبتنی بر مدار مجتمع	تراشه‌های یکپارچه ارتباطی–پردازشی
دامنه پوشش	متوسط تا بسیار بالا (به‌ویژه فیبر نوری)	از چند متر تا چند کیلومتر	قابل تطبیق با هر دو نوع (به‌صورت ماژولار)
نرخ انتقال داده	بسیار بالا	متوسط تا بسیار بالا	وابسته به پروتکل پیاده‌شده؛ عموماً بالا
تاخیر	بسیار کم	متوسط تا کم	بهینه شده برای برنامه‌های بلادرنگ
قابلیت اطمینان	بسیار بالا در محیط‌های نویزی شدید	متغیر؛ وابسته به تداخل امواج و تراکم شبکه	بسیار بالا به‌دلیل هماهنگی داخلی ماژول‌ها
مصرف توان تراشه	متوسط	بسیار کم تا متوسط	پایین‌ترین حالت به دلیل مدیریت توان یکپارچه
پیچیدگی پیاده‌سازی	نیاز به کابل‌کشی و تجهیزات انتشار	نصب آسان و سریع	پیچیدگی بسیار کم؛ همه‌چیز روی یک تراشه
هزینه استقرار	متوسط تا بالا (فیبر گران)	بسیار پایین تا متوسط	بسیار پایین (یکپارچه‌سازی باعث کاهش هزینه کل می‌شود)
امنیت اطلاعات	بالا ولی وابسته به پروتکل‌های خارجی	متغیر؛ نیازمند لایه‌های امنیت نرم‌افزاری	بسیار بالا: رمزگذاری سخت‌افزاری و بوت امن
کاربرد در شبکه قدرت هوشمند	ارتباطات حیاتی: ایستگاه‌ها، پست‌ها و مراکز کنترل	کنتورها، حسگرهای گسترده، IoT شبکه	مدیریت شبکه، پهنای‌باند بالا، امنیت شبکه، کنترل پیشرفته

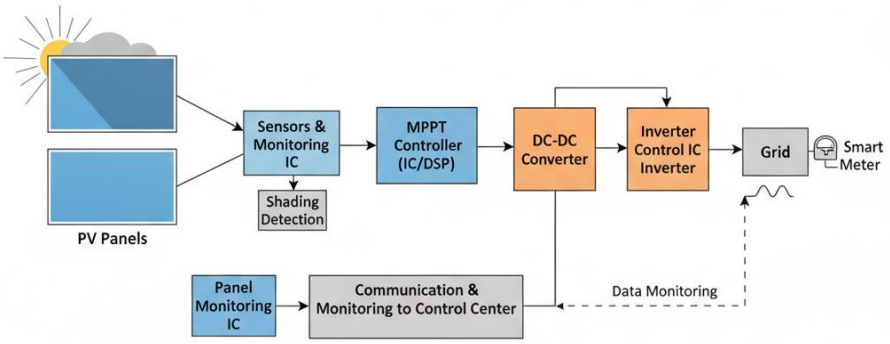
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

مدارهای مجتمع با یکپارچه‌سازی واحدهای حسگری، پردازش، کنترل، ارتباطات و مدیریت توان، امکان بهره‌برداری بهینه از این منابع و اتصال پایدار آن‌ها به شبکه را فراهم می‌سازند. در این بخش، کاربرد مدارهای مجتمع در مهم‌ترین سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های نو و نقش آن‌ها در افزایش بازده، پایداری و کیفیت توان بررسی می‌شود [۷۳،۷۴].

۴-۱- سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک

در سامانه‌های PV، مدارهای مجتمع در ردیابی نقطه حداکثر توان، کنترل اینورتر، پایش پنل‌ها، تشخیص سایه‌زنی، و مدیریت تزریق توان به شبکه کاربرد دارند. استفاده از تراشه‌های هوشمند موجب افزایش بازده و کاهش تلفات این سامانه‌ها می‌شود [۷۵،۷۶].

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در سامانه‌های فتوولتائیک، تراشه‌های هوشمند و مدارهای مجتمع نقش کلیدی در افزایش بازده و کاهش تلفات دارند. این مدارها با اجرای الگوریتم‌های MPPT، کنترل دقیق اینورتر، پایش عملکرد پنل‌ها و تشخیص شرایط غیرعادی مانند سایه‌زنی، بهره‌برداری بهینه از انرژی خورشیدی را ممکن می‌سازند. همچنین، این تراشه‌ها هماهنگی لازم برای تزریق توان به شبکه را فراهم کرده و کیفیت و پایداری عملکرد سامانه را بهبود می‌دهند.



شکل (۱۱): نقش مدارهای مجتمع الکترونیک در سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک، شامل ردیابی نقطه حداکثر توان، کنترل اینورتر، پایش پنل‌ها، تشخیص سایه‌زنی و مدیریت تزریق توان به شبکه.

Figure (11): The role of integrated electronic circuits in photovoltaic solar systems, including maximum power point tracking, inverter control, panel monitoring, shading detection, and grid power injection management.

۴-۲- سامانه‌های بادی

سامانه‌های تولید توان بادی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت مدرن محسوب می‌شوند و به‌دلیل ماهیت متغیر و غیرقابل‌پیش‌بینی سرعت باد، نیازمند سامانه‌های کنترلی دقیق، سریع و هوشمند هستند. برخلاف نیروگاه‌های متعارف که معمولاً توان تولیدی آن‌ها تا حد زیادی قابل برنامه‌ریزی است، توان خروجی توربین‌های بادی به عواملی مانند سرعت باد، جهت باد، چگالی هوا، شرایط محیطی و وضعیت مکانیکی پره‌ها وابسته است. بنابراین، برای استخراج بیشینه توان از باد و تزریق پایدار آن به شبکه، استفاده از کنترل‌کننده‌های پیشرفته و تجهیزات الکترونیکی هوشمند ضروری است [۷۷،۷۸].

در توربین‌های بادی سرعت‌متغیر، مدارهای مجتمع الکترونیک نقش بسیار مهمی در کنترل ژنراتور و مبدل‌های الکترونیک قدرت ایفا می‌کنند. این توربین‌ها معمولاً از ژنراتورهایی مانند ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) یا ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) استفاده می‌کنند که برای اتصال به شبکه به مبدل‌های الکترونیک قدرت نیاز دارند. در این ساختار، مبدل‌های AC/DC/AC وظیفه تبدیل توان الکتریکی تولیدشده با فرکانس و ولتاژ متغیر را به توان قابل تزریق به شبکه با فرکانس و ولتاژ استاندارد بر عهده دارند. مدارهای مجتمع مانند DSPها، FPGAها، میکروکنترلرها، ASICها و درایورهای گیت با تولید سیگنال‌های کنترلی دقیق، عملکرد کلیدهای قدرت را در این مبدل‌ها مدیریت می‌کنند [۷۹،۸۰].

یکی از کاربردهای مهم مدارهای مجتمع در سامانه‌های بادی، اجرای الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) است. از آنجا که توان قابل استخراج از باد با توان سوم سرعت باد متناسب است، تغییرات کوچک در سرعت باد می‌تواند تغییرات قابل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

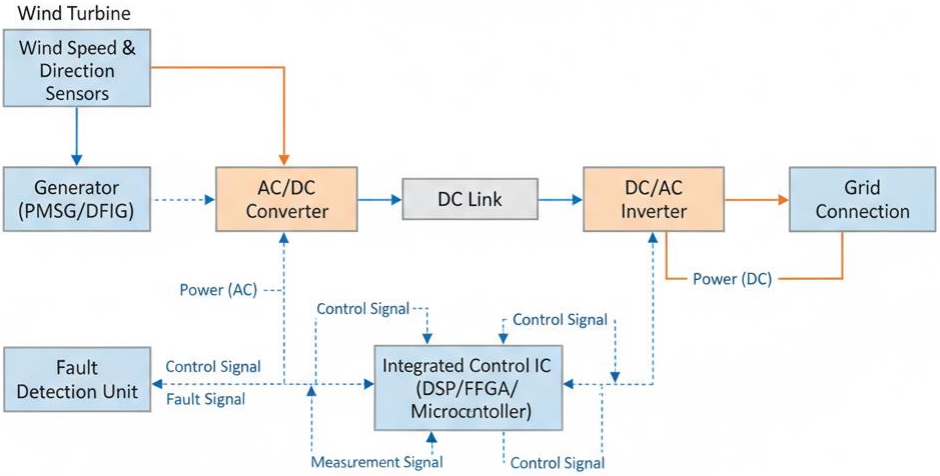
توجهی در توان خروجی ایجاد کند. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدارهای مجتمع با دریافت داده‌های لحظه‌ای از سنسورهای سرعت باد، سرعت چرخش روتور، گشتاور ژنراتور و توان خروجی، نقطه کار بهینه توربین را تعیین می‌کنند. سپس با تنظیم سرعت روتور، زاویه پره‌ها یا فرمان مبدل الکترونیک قدرت، تلاش می‌کنند بیشترین توان ممکن از جریان باد استخراج شود.

علاوه بر کنترل توان، مدارهای مجتمع در سامانه‌های اندازه‌گیری و پایش توربین‌های بادی نیز نقش کلیدی دارند. سنسورهای سرعت و جهت باد، حسگرهای لرزش، دما، جریان، ولتاژ و موقعیت پره‌ها، اطلاعات حیاتی مربوط به وضعیت عملکرد توربین را جمع‌آوری می‌کنند. داده‌های این حسگرها توسط مدارهای واسط، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، فیلترهای سیگنال و پردازنده‌های تعبیه‌شده پردازش می‌شوند. این پردازش سریع و دقیق امکان تشخیص تغییرات ناگهانی باد، نوسانات مکانیکی، عدم تعادل روتور، افزایش دمای تجهیزات و سایر شرایط غیرعادی را فراهم می‌سازد.

مدارهای مجتمع همچنین در بخش حفاظت و تشخیص خطا اهمیت زیادی دارند. توربین‌های بادی معمولاً در شرایط محیطی سخت مانند بادهای شدید، تغییرات دمایی، رطوبت، گردوغبار و ارتعاشات مکانیکی کار می‌کنند. این شرایط می‌تواند منجر به بروز خطاهایی مانند اضافه‌جریان، اضافه‌ولتاژ، افت ولتاژ شبکه، خطای مبدل، خطای ژنراتور، خرابی سنسورها و خطاهای مکانیکی در گیربکس یا پره‌ها شود. واحدهای تشخیص خطای مبتنی بر مدارهای مجتمع با پایش پیوسته پارامترهای الکتریکی و مکانیکی، قادرند خطاها را در زمان کوتاه شناسایی کرده و فرمان‌های حفاظتی مانند کاهش توان، توقف اضطراری توربین، جداسازی از شبکه یا تغییر حالت کنترلی را صادر کنند [۸۱،۸۲].

در توربین‌های بادی متصل به شبکه، کنترل کیفیت توان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. نوسانات سرعت باد می‌تواند باعث نوسان توان خروجی، تغییرات ولتاژ، هارمونیک‌ها و فلیکر در شبکه شود. مدارهای مجتمع مورد استفاده در کنترل مبدل‌ها با اجرای الگوریتم‌هایی مانند کنترل برداری، کنترل توان اکتیو و راکتیو، سنکرون‌سازی با شبکه و فیلترسازی فعال، موجب بهبود کیفیت توان و کاهش اثرات نامطلوب توربین بر شبکه می‌شوند. همچنین، این مدارها می‌توانند در پشتیبانی از ولتاژ، تنظیم ضریب توان و مشارکت در پایداری شبکه نقش داشته باشند.

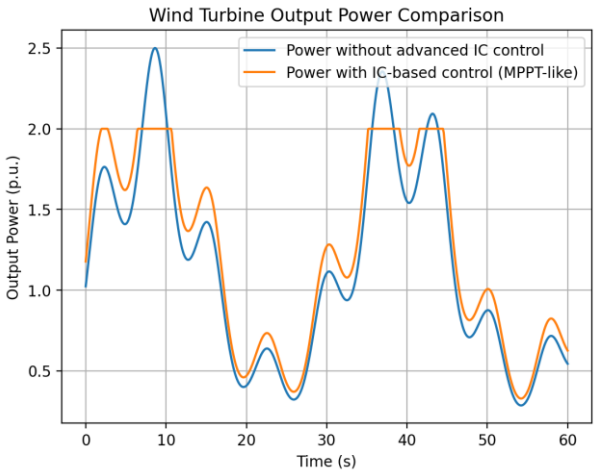
به‌طور کلی، استفاده از مدارهای مجتمع در سامانه‌های بادی باعث افزایش دقت کنترل، بهبود بازده تبدیل انرژی، کاهش تلفات، افزایش قابلیت‌اطمینان و ارتقای ایمنی بهره‌برداری می‌شود. این مدارها به‌عنوان هسته پردازشی و کنترلی توربین‌های بادی مدرن، امکان عملکرد هوشمند، پایدار و انعطاف‌پذیر این سامانه‌ها را در شرایط متغیر باد و شبکه فراهم می‌کنند. بنابراین، توسعه توربین‌های بادی پیشرفته بدون بهره‌گیری از مدارهای مجتمع، پردازنده‌های تعبیه‌شده و تراشه‌های کنترل توان عملاً امکان‌پذیر نخواهد بود.



شکل (۱۲): نقش مدارهای مجتمع الکترونیک در سامانه‌های بادی شامل کنترل ژنراتور، مبدل‌های AC/DC/AC، سنسورهای سرعت و جهت باد، و واحدهای تشخیص خطا در توربین‌های بادی سرعت‌متغیر.

Figure (12): The role of integrated electronic circuits in wind systems including generator control, AC/DC/AC converters, wind speed and direction sensors, and fault detection units in variable speed wind turbines.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



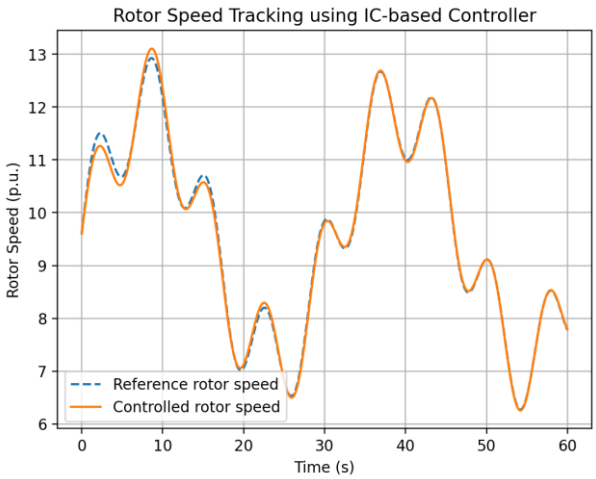
شکل (۱۳): مقایسه توان خروجی توربین بادی
Figure (13): Wind turbine output power comparison

شکل (۱۲) نشان می‌دهد که توربین‌های بادی، به‌ویژه در شرایط سرعت متغیر باد، برای عملکرد بهینه و پایدار به سامانه‌های کنترلی پیشرفته نیاز دارند. مدارهای مجتمع در این ساختار، داده‌های حسگرهای سرعت و جهت باد را پردازش کرده و به کنترل ژنراتور و مبدل‌های AC/DC/AC فرمان می‌دهند. همچنین، واحدهای تشخیص خطا مبتنی بر ICها با پایش مداوم وضعیت عملکرد، بروز خطاهای الکتریکی و مکانیکی را شناسایی کرده و از آسیب به تجهیزات و کاهش پایداری شبکه جلوگیری می‌کنند. این یکپارچگی باعث افزایش بازده، قابلیت‌اطمینان و کیفیت توان در سامانه‌های بادی می‌شود.
شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در سرعت‌های متغیر باد، توان خروجی توربین دچار نوسان می‌شود. در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدارهای مجتمع، مانند DSP، FPGA یا میکروکنترلرهای سریع، توان خروجی بهتر دنبال شده و مقدار توان قابل استخراج افزایش می‌یابد. این کنترل‌کننده‌ها با تنظیم مبدل‌های الکترونیک قدرت و اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی، عملکرد توربین را بهبود می‌دهند. شکل (۱۴) عملکرد کنترل سرعت روتور را نشان می‌دهد. سرعت مرجع روتور با توجه به تغییرات سرعت باد تعیین می‌شود و کنترل‌کننده مبتنی بر مدارهای مجتمع تلاش می‌کند سرعت واقعی روتور را به مقدار مرجع نزدیک نگه دارد. دقت بالا و زمان پاسخ سریع این کنترل‌کننده‌ها موجب می‌شود توربین در نقطه کاری مناسب‌تری عمل کند. این دو نمودار نشان می‌دهد که استفاده از مدارهای مجتمع هوشمند در سامانه‌های بادی می‌تواند موجب بهبود عملکرد دینامیکی توربین و افزایش توان استخراج‌شده از باد شود. در شرایط سرعت متغیر باد، توان خروجی توربین به‌شدت تحت تأثیر تغییرات باد قرار می‌گیرد و بدون کنترل مناسب، بخشی از انرژی قابل استخراج از دست می‌رود. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدارهای مجتمع با پردازش سریع داده‌های سنسورها، کنترل دقیق مبدل‌های AC/DC/AC و تنظیم سرعت روتور، امکان بهره‌برداری نزدیک به نقطه بهینه را فراهم می‌کنند. همچنین، ردیابی مناسب سرعت مرجع روتور نشان می‌دهد که این کنترل‌کننده‌ها می‌توانند پاسخ دینامیکی توربین را بهبود داده، نوسانات توان را کاهش دهند و پایداری تزریق توان به شبکه را افزایش دهند.

۳-۴- سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی از اجزای کلیدی شبکه‌های قدرت مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند، زیرا با جبران نوسانات تولید منابعی مانند خورشید و باد، تعادل بین تولید و مصرف را برقرار می‌کنند. در این میان، باتری‌ها و ابرخازن‌ها بیشترین کاربرد را دارند. باتری‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر مناسب‌اند، در حالی که ابرخازن‌ها به دلیل سرعت بالای شارژ و دشارژ، برای جبران نوسانات سریع و گذرا به کار می‌روند [۸۳،۸۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026



شکل (۱۴): ردیابی سرعت روتور توسط کنترل‌کننده
Figure (14): Rotor speed tracking by controller

عملکرد ایمن و بهینه این سامانه‌ها به‌شدت به مدارهای مجتمع الکترونیکی وابسته است. در باتری‌ها، سیستم مدیریت باتری با استفاده از تراشه‌های تخصصی، وظایفی مانند اندازه‌گیری ولتاژ و جریان، پایش دما، توازن سلولی، تخمین وضعیت شارژ و وضعیت سلامت، و همچنین حفاظت در برابر اضافه‌شارژ، اضافه‌دشارژ و افزایش دما را انجام می‌دهد. این قابلیت‌ها موجب افزایش ایمنی، طول عمر و بازده بسته‌های باتری می‌شوند. در مورد ابرخازن‌ها نیز مدارهای مجتمع نقش مهمی در پایش ولتاژ، کنترل فرآیند شارژ و دشارژ، و هماهنگی عملکرد آن‌ها با سایر اجزای ذخیره‌سازی ایفا می‌کنند. در سامانه‌های هیبریدی باتری–ابرخازن، کنترل هوشمند مبتنی بر IC باعث می‌شود باتری بارهای بلندمدت را تأمین کند و ابرخازن پاسخ نوسانات سریع را بر عهده بگیرد؛ موضوعی که به کاهش تنش روی باتری و افزایش عمر مفید کل سامانه منجر می‌شود. در مجموع، مدارهای مجتمع با فراهم‌کردن قابلیت‌های پایش، حفاظت، کنترل و مدیریت هوشمند، نقش محوری در ارتقای عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی داشته و به یکی از پایه‌های اصلی توسعه شبکه‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو تبدیل شده‌اند.

جدول (۳) نشان می‌دهد که مدارهای مجتمع در هر دو سامانه BMS و ابرخازن نقشی فراتر از اندازه‌گیری ساده دارند و عملاً مرکز اصلی پایش، حفاظت، کنترل، تخمین وضعیت و ارتباطات محسوب می‌شوند. در باتری‌ها، ICها بیشتر بر مدیریت ایمن و دقیق سلول‌ها متمرکز هستند، در حالی که در ابرخازن‌ها تمرکز اصلی بر پاسخ سریع، کنترل توان گذرا و توازن ولتاژ قرار دارد. ترکیب این قابلیت‌ها در سامانه‌های هیبریدی ذخیره‌سازی، منجر به بهبود پایداری، افزایش طول عمر و ارتقای کارایی شبکه‌های قدرت هوشمند می‌شود.

۴-۴- ریزشبکه‌ها و شبکه‌های محلی

ریزشبکه‌ها سامانه‌های محلی هوشمندی هستند که با ترکیب منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای الکتریکی، امکان تأمین انرژی پایدار، قابل‌کنترل و انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها می‌توانند به شبکه اصلی متصل باشند یا در شرایط اضطراری به‌صورت جزیره‌ای عمل کنند. تحقق این قابلیت‌ها تا حد زیادی وابسته به مدارهای مجتمع الکترونیکی (ICها) است که قلب کنترلی و حفاظتی ریزشبکه را تشکیل می‌دهند.

مدارهای مجتمع نقش مهمی در هماهنگی منابع تولید پراکنده ایفا می‌کنند. این تراشه‌ها وضعیت لحظه‌ای تولید PV، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازها و ژنراتورها را پایش کرده و با اجرای الگوریتم‌های کنترلی، سهم توان هر منبع را تنظیم می‌کنند. همچنین ICها در کنترل فرکانس و ولتاژ نقش محوری دارند و با پردازش سریع داده‌ها، پایداری ولتاژ و جلوگیری از انحراف فرکانس در حالت متصل به شبکه یا حالت جزیره‌ای را تضمین می‌کنند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

Table (3): Classification of the role of integrated circuits in battery and supercapacitor management systems

جدول (۳): طبقه‌بندی نقش مدارهای مجتمع در سامانه‌های مدیریت باتری و ابرخازن

اثر بر عملکرد سیستم قدرت	نفش مدارهای مجتمع در سامانه ابرخازن	نقش مدارهای مجتمع در سیستم مدیریت باتری	حوزه عملکرد
افزایش دقت کنترلی و جلوگیری از عملکرد خارج از محدوده مجاز	اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال، جریان لحظه‌ای و سطح انرژی ذخیره‌شده	اندازه‌گیری دقیق ولتاژ سلول‌ها، جریان شارژ/دشارژ و تشخیص اضافه‌ولتاژ/کم‌ولتاژ	پایش الکتریکی
افزایش ایمنی، کاهش تنش حرارتی و افزایش طول عمر	پایش دمای ماژول ابرخازن در شرایط شارژ/دشارژ سریع	اندازه‌گیری دمای سلول‌ها و ماژول‌ها، تشخیص نقاط داغ و پیشگیری از فرار حرارتی	پایش حرارتی
افزایش قابلیت اطمینان و کاهش احتمال خرابی تجهیزات	حفاظت در برابر اضافه‌ولتاژ، تخلیه ناگهانی و اضافه‌جریان	حفاظت در برابر اضافه‌شارژ، اضافه‌دشارژ، اتصال کوتاه و جریان بیش از حد	حفاظت الکترونیکی
افزایش عمر مفید، بهره‌برداری یکنواخت و جلوگیری از عدم تقارن	توازن ولتاژ بین سلول‌های سری ابرخازن	توازن سلولی پسیو یا اکتیو بین سلول‌های باتری	توازن انرژی
بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و بهره‌برداری هوشمند	تخمین سطح انرژی و آمادگی پاسخ دینامیکی	برآورد وضعیت شارژ ، وضعیت سلامت	تخمین وضعیت
بهبود پایداری توان و کیفیت انرژی	کنترل تبادل توان سریع در پاسخ به اغتشاشات و بارهای گذرا	کنترل شارژ/دشارژ باتری و هماهنگی با مبدل‌های DC/DC و اینورتر	کنترل توان
افزایش بازده کل و کاهش استهلاک سامانه ذخیره‌سازی	پاسخ‌گویی سریع به نوسانات لحظه‌ای در کنار باتری	هماهنگی با ابرخازن برای کاهش تنش سیکلی باتری	مدیریت هیبریدی
افزایش سرعت پاسخ و بهبود عملکرد دینامیکی	اجرای منطق کنترل سریع برای تخصیص توان لحظه‌ای	استفاده از میکروکنترل‌گر، DSP یا SoC برای اجرای الگوریتم‌های کنترلی و پیش‌بینی	پردازش و تصمیم‌گیری
یکپارچگی با شبکه هوشمند و امکان پایش بلادرنگ	ارسال داده وضعیت و دریافت فرمان از سیستم کنترلی	تبادل اطلاعات با EMS، اینورتر، شارژر و مرکز کنترل	ارتباطات داده
ارتقای امنیت عملکرد و کاهش هزینه تعمیرات	تشخیص خرابی ماژول و جلوگیری از گسترش خطا	ثبت خطا، هشداردهی و جداسازی بخش معیوب بسته باتری	افزایش قابلیت اطمینان

از سوی دیگر، مدیریت بار در ریزشبکه با کمک ICهای اندازه‌گیری و کنترل انجام می‌شود. این مدارها امکان شناسایی بارهای حیاتی، اجرای پاسخگویی بار، و مدیریت مصرف در شرایط بحرانی را فراهم می‌کنند. ICها همچنین در سنکرون‌سازی هنگام اتصال یا جداسازی ریزشبکه از شبکه اصلی ضروری‌اند؛ زیرا هماهنگی دقیق ولتاژ، فرکانس و زاویه فاز بدون اندازه‌گیری و پردازش سریع مبتنی بر IC ممکن نیست.

در حوزه حفاظت موضعی نیز مدارهای مجتمع وظیفه تشخیص سریع خطاها، قطع بخش‌های معیوب و جلوگیری از گسترش اختلال را بر عهده دارند. این نوع حفاظت در ریزشبکه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا مسیرهای توان پویا و تغییرپذیر هستند و روش‌های حفاظتی سنتی کافی نیستند.

به طور خلاصه، مدارهای مجتمع باعث می‌شوند ریزشبکه‌ها به سامانه‌هایی قابل‌اعتماد، خودپایش، هماهنگ و انعطاف‌پذیر تبدیل شوند. بدون حضور ICها، تحقق عملکرد پایدار، ایمن و هوشمند ریزشبکه عملاً ممکن نخواهد بود. مدارهای مجتمع در ریزشبکه‌ها تنها به عنوان اجزای کنترلی ساده عمل نمی‌کنند، بلکه زیرساخت اصلی پایش، کنترل، حفاظت، ارتباطات و هوشمندسازی را تشکیل می‌دهند. این تراشه‌ها با فراهم‌سازی اندازه‌گیری دقیق، کنترل سریع، ارتباط امن و پردازش بلادرنگ،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

امکان بهره‌برداری پایدار و انعطاف‌پذیر از ریزشبکه را فراهم می‌کنند. در واقع، هرچه معماری ICها پیشرفته‌تر و یکپارچه‌تر باشد، ریزشبکه از نظر پایداری، بازده، امنیت و قابلیت اطمینان عملکرد بهتری خواهد داشت.

جدول (۴) طبقه‌بندی ارائه‌شده، تصویری نظام‌مند از جایگاه و کارکرد مدارهای مجتمع الکترونیکی در ساختار عملیاتی ریزشبکه‌ها فراهم می‌سازد. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، ICها در طیف گسترده‌ای از لایه‌های عملکردی ریزشبکه، شامل اندازه‌گیری، کنترل، حفاظت، مدیریت انرژی، ارتباطات، امنیت و پردازش هوشمند، نقش‌آفرینی می‌کنند. این گستره کاربرد بیانگر آن است که ریزشبکه‌های مدرن، به‌ویژه در معماری‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی، به‌صورت بنیادین بر قابلیت‌های مدارهای مجتمع متکی هستند. در سطح نخست، تراشه‌های مرتبط با پایش و اندازه‌گیری زیرساخت اطلاعاتی لازم را برای بهره‌برداری هوشمند از ریزشبکه فراهم می‌کنند. این مدارها با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر ولتاژ، جریان، توان، فرکانس و دما، داده‌های بلادرنگ و دقیقی را در اختیار واحدهای کنترل و حفاظت قرار می‌دهند. کیفیت عملکرد این لایه، تأثیر مستقیمی بر صحت تصمیم‌گیری در سایر لایه‌ها دارد؛ ازاین‌رو، ICهای اندازه‌گیری را می‌توان به‌عنوان پایه اطلاعاتی کل سامانه تلقی کرد. در ادامه، کنترل منابع تولید پراکنده و کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد ICها مطرح می‌شوند. با توجه به ماهیت متغیر و غیرخطی منابعی نظیر سامانه‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و سامانه‌های ذخیره‌سازی، استفاده از تراشه‌های پردازشی نظیر میکروکنترل‌گرها، DSPها، FPGAها و SoCها برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته ضروری است. این مدارها با تنظیم سهم توان هر منبع، کنترل مبدل‌ها و پاسخ‌گویی سریع به تغییرات شرایط بهره‌برداری، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت توان، افزایش بازده انرژی و حفظ پایداری سیستم ایفا می‌کنند. یکی دیگر از ابعاد کلیدی مطرح‌شده در جدول، کنترل فرکانس و ولتاژ در ریزشبکه است. این موضوع به‌ویژه در حالت جزیره‌ای، که ریزشبکه از پشتیبانی دینامیکی شبکه اصلی محروم است، اهمیت مضاعف می‌یابد. تراشه‌های کنترلی با دریافت داده‌های اندازه‌گیری‌شده و اجرای الگوریتم‌های کنترلی در زمان واقعی، به تنظیم سریع ولتاژ و فرکانس پرداخته و از بروز ناپایداری جلوگیری می‌کنند. از این منظر، ICها در تحقق پایداری گذرا و ماندگار ریزشبکه، نقش ساختاری و غیرقابل‌جایگزینی دارند. علاوه بر این، جدول نشان می‌دهد که مدارهای مجتمع در مدیریت انرژی و مدیریت بار نیز جایگاه محوری دارند. در این حوزه، تراشه‌های پردازشی نه‌تنها مسئول اجرای تصمیم‌های کنترلی محلی هستند، بلکه وظیفه تحلیل وضعیت کلی تولید، مصرف و ذخیره‌سازی را نیز بر عهده دارند. این قابلیت امکان بهینه‌سازی توزیع توان، اولویت‌بندی بارها، اجرای پاسخگویی بار و برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری اقتصادی‌تر از منابع را فراهم می‌آورد. در نتیجه، ICها در این سطح، از یک عنصر صرفاً اجرایی فراتر رفته و به بخشی از هسته تصمیم‌ساز ریزشبکه تبدیل می‌شوند.

از منظر قابلیت اطمینان و ایمنی بهره‌برداری، سنکرون‌سازی و حفاظت موضعی نیز از جمله کارکردهای راهبردی مدارهای مجتمع محسوب می‌شوند. سنکرون‌سازی دقیق هنگام اتصال یا جداسازی ریزشبکه از شبکه اصلی نیازمند اندازه‌گیری سریع و پردازش دقیق ولتاژ، فرکانس و زاویه فاز است که تنها با بهره‌گیری از ICهای تخصصی قابل تحقق است. همچنین در بخش حفاظت، رله‌های دیجیتال و تراشه‌های حفاظتی با تشخیص سریع خطا، تعیین محل تقریبی آن و صدور فرمان قطع، از گسترش اختلال و آسیب به تجهیزات جلوگیری می‌کنند. با توجه به ماهیت پویا و چندمنبعی ریزشبکه‌ها، این سطح از حفاظت هوشمند برای تضمین عملکرد ایمن کاملاً ضروری است. در بخش دیگری از جدول، نقش ICها در زیرساخت ارتباطی و امنیت سخت‌افزاری مورد تأکید قرار گرفته است. توسعه ریزشبکه‌های هوشمند مستلزم تبادل مستمر داده میان منابع تولید، ذخیره‌سازها، بارها، کنتورهای هوشمند و سامانه مدیریت انرژی است. این فرایند با استفاده از تراشه‌های مخابراتی سیمی و بی‌سیم محقق می‌شود. به‌موازات آن، افزایش سطح اتصال‌پذیری ریزشبکه‌ها، ضرورت استفاده از تراشه‌های امنیتی برای رمزنگاری، احراز هویت و حفاظت از داده‌ها و تجهیزات در برابر تهدیدات سایبری را برجسته ساخته است. ازاین‌رو، ICها نه‌تنها ابزار تحقق کنترل و ارتباط، بلکه عامل مهمی در ارتقای تاب‌آوری سایبری سامانه نیز محسوب می‌شوند. در نهایت، جدول به دو حوزه روبه‌رشد مدیریت ذخیره‌سازی انرژی و پردازش هوشمند اشاره دارد که نقش آن‌ها در معماری ریزشبکه‌های آینده بیش از پیش افزایش خواهد یافت.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

Table (4): Classification of the role of integrated circuits in microgrids

جدول (۴): طبقه‌بندی نقش مدارهای مجتمع در ریزشبکه‌ها

اثر بر عملکرد سیستم	وظیفه اصلی در ریزشبکه	نوع تراشه IC	حوزه عملکرد
افزایش دقت پایش، فراهم‌سازی داده‌های بلادرنگ برای کنترل و حفاظت	اندازه‌گیری ولتاژ، جریان، فرکانس، توان و دما در نقاط مختلف ریزشبکه	حسگرهای مجتمع، ADC، ICهای اندازه‌گیری	پایش و اندازه‌گیری
بهبود هماهنگی منابع و افزایش بازده بهره‌برداری	کنترل عملکرد منابعی مانند PV، باد، باتری و دیزل ژنراتور و تنظیم سهم توان هر واحد	میکروکنترل‌گرها، DSP، FPGA، SoC	کنترل منابع تولید پراکنده
پایداری توان، کاهش تلفات سوئیچینگ و بهبود کیفیت توان	کنترل اینورترها، یکسوسازها و مبدل‌های DC/DC و AC/DC/AC	ICهای درایور گیت، کنترلر PWM، DSP	کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت
حفظ پایداری دینامیکی و جلوگیری از انحراف پارامترهای شبکه	اجرای کنترل اولیه و ثانویه برای تثبیت فرکانس و ولتاژ در حالت متصل و جزیره‌ای	DSP، SoC، کنترلرهای دیجیتال	کنترل فرکانس و ولتاژ
بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش کارایی کل ریزشبکه	تصمیم‌گیری درباره توزیع توان، اولویت‌بندی منابع و زمان‌بندی ذخیره‌سازی/مصرف	پردازنده‌های نهفته، SoC، ASIC	مدیریت انرژی ((EMS
جلوگیری از اضافه‌بار و ارتقای قابلیت اطمینان	شناسایی بارهای حیاتی و غیرحیاتی، اجرای پاسخگویی بار و کنترل بار در شرایط بحرانی	میکروکنترل‌گر، ICهای مخابراتی، کنتور هوشمند	مدیریت بار
جلوگیری از ناپایداری و کاهش ضربه‌های گذرا	همگام‌سازی ولتاژ، فرکانس و زاویه فاز پیش از اتصال به شبکه یا منابع دیگر	ICهای PLL، DSP، کنترلرهای سنکرون‌ساز	سنکرون‌سازی
کاهش زمان رفع خطا و جلوگیری از گسترش اختلال	تشخیص خطا، جداسازی بخش معیوب و اجرای حفاظت تطبیقی	رله‌های دیجیتال، ICهای حفاظتی، FPGA	حفاظت موضعی
تسهیل کنترل توزیع‌شده و بهبود هماهنگی اجزای ریزشبکه	انتقال داده میان کنترلرها، کنتورها، منابع و مرکز مدیریت	ICهای PLC، RF، Wi-Fi، Zigbee، LoRa، G۵	ارتباطات و تبادل داده
افزایش امنیت زیرساخت ارتباطی و کنترلی	رمزنگاری داده‌ها، احراز هویت تجهیزات و جلوگیری از نفوذ سایبری	Crypto-chip، TPM، Secure IC	امنیت سخت‌افزاری
افزایش عمر ذخیره‌سازها و بهبود قابلیت اطمینان تأمین توان	پایش سلول‌ها، تخمین SOC/SOH، بالانس سلولی و حفاظت باتری	ICهای BMS، ADC، کنترلر بالانس	مدیریت ذخیره‌سازی انرژی
ارتقای سطح هوشمندی و پاسخ‌پذیری ریزشبکه	پیش‌بینی بار، تشخیص ناهنجاری، بهینه‌سازی عملکرد و تصمیم‌گیری بلادرنگ	AI-on-Chip، FPGA، SoCهای پیشرفته	پردازش هوشمند و تصمیم‌گیری

تراشه‌های مدیریت باتری با پایش وضعیت سلول‌ها، توازن‌سازی، تخمین SOC/SOH و حفاظت حرارتی، بهره‌برداری مطمئن از ذخیره‌سازها را امکان‌پذیر می‌کنند. همچنین ظهور تراشه‌های هوشمند، زمینه را برای اجرای الگوریتم‌های پیش‌بینی بار، تشخیص ناهنجاری، نگهداری پیش‌بینانه و بهینه‌سازی بلادرنگ در سطح سخت‌افزار فراهم کرده است. این روند، افق جدیدی را برای ارتقای خودمختاری و هوشمندی ریزشبکه‌ها ترسیم می‌کند. به‌طور کلی، تحلیل جدول نشان می‌دهد که مدارهای مجتمع در ریزشبکه‌ها صرفاً اجزای جانبی یا ابزارهای کنترلی محدود نیستند، بلکه به‌عنوان هسته فناورانه بهره‌برداری، هماهنگی و هوشمندسازی سامانه عمل می‌کنند. از این منظر، پیشرفت در طراحی و یکپارچه‌سازی ICها می‌تواند تأثیر مستقیمی بر بهبود پایداری، بازده، امنیت، انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها داشته باشد. بنابراین، در مسیر توسعه شبکه‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو، توجه به نقش راهبردی مدارهای مجتمع نه‌تنها ضروری، بلکه تعیین‌کننده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]

۵- چالش‌ها و محدودیت‌ها

استفاده از مدارهای مجتمع در سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو، مزایای متعددی به همراه دارد که می‌توان به کاهش ابعاد و وزن تجهیزات، کاهش مصرف توان داخلی سامانه، افزایش سرعت پردازش و پاسخ، بهبود دقت اندازه‌گیری و کنترل، کاهش هزینه‌های تولید انبوه، افزایش قابلیت‌اطمینان، امکان یکپارچه‌سازی چند وظیفه در یک تراشه و پشتیبانی از الگوریتم‌های هوشمند و بلادرنگ اشاره نمود [۸۵،۸۶].

با وجود مزایای گسترده مدارهای مجتمع الکترونیک در توسعه سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو، به‌کارگیری این فناوری‌ها با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، اقتصادی و عملیاتی همراه است. مدارهای مجتمع در این حوزه تنها به‌عنوان قطعات پردازشی ساده عمل نمی‌کنند، بلکه در بخش‌های حسگری، اندازه‌گیری، کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، حفاظت، مخابرات، مدیریت انرژی و امنیت سامانه به‌کار گرفته می‌شوند. ازاین‌رو، عملکرد صحیح آن‌ها تأثیر مستقیمی بر پایداری، قابلیت‌اطمینان، کیفیت توان و امنیت شبکه دارد. شرایط کاری سخت تجهیزات قدرت، افزایش سطح اتصال‌پذیری، پیچیدگی طراحی تراشه‌های تخصصی و نیاز به عملکرد پایدار در بازه‌های زمانی طولانی، از جمله عواملی هستند که استفاده از مدارهای مجتمع را در این حوزه با محدودیت‌هایی روبه‌رو می‌سازند.

۵-۱- شرایط محیطی سخت

یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از مدارهای مجتمع در سیستم‌های قدرت هوشمند، قرارگیری آن‌ها در محیط‌های عملیاتی سخت و پرتنش است. تجهیزات قدرت، به‌ویژه در سامانه‌های متصل به منابع انرژی تجدیدپذیر مانند مزارع خورشیدی، توربین‌های بادی، ریزشبکه‌ها و ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی، اغلب در معرض دمای بالا، تغییرات سریع دمایی، رطوبت، گردوغبار، ارتعاشات مکانیکی و تابش مستقیم خورشید قرار دارند. این شرایط می‌تواند عملکرد الکتریکی مدارهای مجتمع را تحت تأثیر قرار داده و موجب تغییر پارامترهای داخلی، افزایش نشتی جریان، کاهش دقت اندازه‌گیری و حتی خرابی زودهنگام تراشه شود [۸۷،۸۸].

علاوه بر عوامل محیطی، نویز الکترومغناطیسی یکی دیگر از مشکلات جدی در سامانه‌های قدرت است. مبدل‌های الکترونیک قدرت، اینورترها، کلیدهای نیمه‌هادی سریع، خطوط انتقال و تجهیزات سوئیچینگ، منابع اصلی تولید تداخل الکترومغناطیسی هستند. این نویزها می‌توانند سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده توسط حسگرها، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال و مدارهای کنترلی را دچار اعوجاج کنند. در نتیجه، تصمیمات کنترلی نادرست، عملکرد نامطلوب اینورترها، خطا در تشخیص وضعیت شبکه یا صدور فرمان‌های حفاظتی اشتباه ممکن است رخ دهد [۸۹،۹۰].

تنش‌های الکتریکی شدید مانند اضافه‌ولتاژ، اضافه‌جریان، صاعقه، کلیدزنی بارهای بزرگ و وقوع خطاهای شبکه نیز می‌توانند به مدارهای مجتمع آسیب وارد کنند. بنابراین، طراحی تراشه‌های مقاوم در برابر شرایط سخت نیازمند استفاده از فناوری‌های ساخت مناسب، مدارهای حفاظتی داخلی، ایزولاسیون الکتریکی، فیلترهای ضدنویز، طراحی مقاوم در برابر دما و بسته‌بندی‌های صنعتی است. در بسیاری از کاربردهای قدرت، تنها عملکرد سریع تراشه کافی نیست، بلکه توانایی آن در حفظ دقت و پایداری در شرایط سخت عملیاتی اهمیت اساسی دارد [۹۱،۹۲].

۵-۲- امنیت سایبری

با گسترش شبکه‌های هوشمند، سامانه‌های اندازه‌گیری پیشرفته، کنتورهای هوشمند، تجهیزات اینترنت اشیای انرژی و ارتباطات بلادرنگ، سطح اتصال‌پذیری سیستم‌های قدرت به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است [۹۳،۹۴]. این اتصال‌پذیری اگرچه امکان پایش، کنترل و مدیریت هوشمند انرژی را فراهم می‌کند، اما در عین حال سطح حمله سایبری را نیز گسترش می‌دهد. در چنین شرایطی، مدارهای مجتمع به‌کاررفته در تجهیزات اندازه‌گیری، کنترل، مخابرات و حفاظت می‌توانند به یکی از نقاط حساس امنیتی تبدیل شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

حملات سایبری در سیستم‌های قدرت ممکن است به شکل دستکاری داده‌های اندازه‌گیری، ارسال فرمان‌های کنترلی جعلی، اختلال در ارتباطات، نفوذ به کنتورهای هوشمند، حملات انکار سرویس، تغییر تنظیمات حفاظتی یا ایجاد داده‌های نادرست برای سامانه مدیریت انرژی ظاهر شوند. برای مثال، اگر داده‌های ولتاژ، جریان یا توان به‌صورت غیرمجاز تغییر داده شوند، مرکز کنترل ممکن است تصمیم‌های اشتباه درباره مدیریت بار، شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها یا جداسازی بخش‌هایی از شبکه اتخاذ کند. همچنین، نفوذ به واحدهای حفاظتی می‌تواند باعث عملکرد نابهنگام رله‌ها یا جلوگیری از عملکرد صحیح آن‌ها در زمان خطا شود [۹۵،۹۶].

به همین دلیل، ادغام سازوکارهای امنیتی در سطح سخت‌افزار و مدارهای مجتمع اهمیت فزاینده‌ای دارد. استفاده از ماژول‌های رمزنگاری سخت‌افزاری، بوت امن، احراز هویت سخت‌افزاری، ذخیره‌سازی امن کلیدها، شتاب‌دهنده‌های رمزنگاری، تشخیص دستکاری فیزیکی و معماری‌های مقاوم در برابر حملات کانال جانبی می‌تواند امنیت تجهیزات هوشمند را افزایش دهد. در واقع، امنیت سایبری در شبکه‌های قدرت آینده تنها یک موضوع نرم‌افزاری نخواهد بود، بلکه باید از سطح طراحی تراشه و سخت‌افزار آغاز شود.

۵-۳- هزینه طراحی و ساخت

یکی دیگر از محدودیت‌های مهم در توسعه مدارهای مجتمع برای سیستم‌های قدرت هوشمند، هزینه بالای طراحی، ساخت، آزمون و اعتبارسنجی تراشه‌ها است. طراحی مدارهای مجتمع تخصصی، به‌ویژه ASICها، نیازمند فرآیندهای پیچیده طراحی الکترونیکی، شبیه‌سازی، ساخت نمونه اولیه، تست، اصلاح طراحی و تولید صنعتی است. این فرآیندها به ابزارهای طراحی پیشرفته، تیم‌های متخصص، زیرساخت آزمایشگاهی و سرمایه‌گذاری قابل توجه نیاز دارند.

در کاربردهای خاص مانند کنترل مبدل‌های قدرت، پردازش داده‌های حسگرها، تشخیص خطا یا امنیت سخت‌افزاری، طراحی ASIC می‌تواند عملکرد بسیار سریع، مصرف توان کم، ابعاد کوچک و قابلیت‌اطمینان بالا فراهم کند. با این حال، هزینه اولیه طراحی و ساخت آن معمولاً زیاد است و تنها زمانی توجیه اقتصادی دارد که حجم تولید بالا باشد یا الزامات فنی به‌گونه‌ای باشد که استفاده از راهکارهای عمومی امکان‌پذیر نباشد. در مقابل، فناوری‌هایی مانند FPGA، میکروکنترلرهای صنعتی، DSPها و سامانه‌های روی تراشه نیمه‌سفارشی می‌توانند انعطاف‌پذیری بیشتری فراهم کرده و برای کاربردهای پژوهشی، نمونه‌سازی سریع و تولید محدود مقرون‌به‌صرفه‌تر باشند [۹۷،۹۸].

از سوی دیگر، هزینه تنها به طراحی تراشه محدود نمی‌شود. آزمون قابلیت‌اطمینان، سازگاری الکترومغناطیسی، استانداردهای ایمنی، بسته‌بندی صنعتی، مدیریت حرارت، و گواهی‌های لازم برای استفاده در سامانه‌های قدرت نیز هزینه‌های قابل توجهی ایجاد می‌کنند. بنابراین، انتخاب میان ASIC، FPGA، DSP یا SoC باید بر اساس معیارهایی مانند حجم تولید، سطح عملکرد موردنیاز، مصرف توان، هزینه، زمان ورود به بازار، قابلیت به‌روزرسانی و الزامات ایمنی انجام شود.

۵-۴- قابلیت‌اطمینان بلندمدت

در سیستم‌های قدرت، قابلیت‌اطمینان یکی از معیارهای اساسی طراحی و بهره‌برداری است. برخلاف بسیاری از تجهیزات مصرفی که خرابی آن‌ها پیامد محدودی دارد، خرابی یک تراشه کوچک در یک تجهیز قدرت می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد اینورتر، از کار افتادن سامانه حفاظتی، قطع ارتباطات، خطا در مدیریت انرژی یا حتی ناپایداری بخشی از شبکه شود. ازاین‌رو، مدارهای مجتمع به‌کاررفته در شبکه‌های هوشمند باید برای عملکرد طولانی‌مدت، پایدار و ایمن طراحی شوند.

عوامل متعددی می‌توانند قابلیت‌اطمینان بلندمدت مدارهای مجتمع را کاهش دهند. دمای بالا، چرخه‌های حرارتی، اضافه‌ولتاژهای گذرا، نویز الکترومغناطیسی، پیرشدگی قطعات، مهاجرت الکترونی، تخریب اکسید گیت، رطوبت و تنش‌های مکانیکی از جمله این عوامل هستند. این پدیده‌ها ممکن است به‌تدریج موجب کاهش دقت مدار، افزایش خطاهای محاسباتی، افت عملکرد یا خرابی کامل تراشه شوند. در سامانه‌هایی مانند نیروگاه‌های خورشیدی و بادی که تجهیزات معمولاً در محیط‌های دورافتاده و سخت نصب می‌شوند، تعمیر و تعویض قطعات نیز هزینه‌بر و زمان‌بر است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

برای کاهش این ریسک‌ها، طراحی مدارهای مجتمع باید همراه با راهکارهایی مانند افزونگی سخت‌افزاری، تشخیص خطای داخلی، خودآزمایی، تحمل‌پذیری خطا، مسیرهای کنترلی پشتیبان، نظارت بر دمای تراشه و طراحی محافظه‌کارانه انجام شود. در تجهیزات حیاتی، استفاده از معماری‌های افزونه و سیستم‌های ایمن در برابر خرابی[۴۰] می‌تواند از گسترش خطا جلوگیری کند. همچنین، ارزیابی قابلیت‌اطمینان از طریق آزمون‌های شتاب‌یافته حرارتی، آزمون‌های تنش الکتریکی، تحلیل نرخ خرابی و مدل‌سازی طول عمر برای اطمینان از عملکرد پایدار در دوره بهره‌برداری ضروری است.

۵-۵- پیچیدگی یکپارچه‌سازی

مدارهای مجتمع مورد استفاده در سیستم‌های قدرت هوشمند معمولاً باید چندین عملکرد مختلف را به‌صورت هم‌زمان پشتیبانی کنند. این عملکردها شامل اندازه‌گیری سیگنال‌های آنالوگ، پردازش دیجیتال، کنترل بلادرنگ، ارتباطات مخابراتی، رمزنگاری داده‌ها، مدیریت توان، ایزولاسیون و تعامل با کلیدهای قدرت است. ترکیب این بخش‌ها در یک سامانه واحد، پیچیدگی طراحی و تست را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. یکی از چالش‌های اصلی، یکپارچه‌سازی بخش‌های آنالوگ و دیجیتال در کنار مدارهای مرتبط با قدرت است. بخش‌های آنالوگ مانند تقویت‌کننده‌ها، فیلترها و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال باید دقت بالایی داشته باشند، در حالی که بخش‌های دیجیتال با فرکانس بالا کار می‌کنند و می‌توانند نویز سوئیچینگ تولید کنند. این نویز ممکن است بر عملکرد مدارهای اندازه‌گیری اثر گذاشته و باعث کاهش دقت داده‌ها شود. از طرف دیگر، بخش‌های مخابراتی و رمزنگاری نیز نیازمند طراحی خاص برای تأمین پهنای باند، امنیت و مصرف توان مناسب هستند [۱۰۱-۹۹].

در سطح سامانه نیز تعامل میان مدارهای مجتمع، مبدل‌های الکترونیک قدرت، حسگرها، تجهیزات حفاظتی، شبکه‌های مخابراتی و سامانه‌های مدیریت انرژی باید به‌دقت طراحی شود. هرگونه ناسازگاری میان پروتکل‌های ارتباطی، زمان‌بندی پردازش، سطح ولتاژ سیگنال‌ها، ایزولاسیون، یا استانداردهای کنترلی می‌تواند عملکرد کل سامانه را مختل کند. علاوه بر این، تست چنین سامانه‌هایی به دلیل تعداد زیاد حالت‌های کاری، سناریوهای خطا، شرایط محیطی و الزامات ایمنی بسیار پیچیده است.

بنابراین، طراحی موفق مدارهای مجتمع برای سیستم‌های قدرت هوشمند نیازمند رویکردی میان‌رشته‌ای است که دانش الکترونیک مجتمع، الکترونیک قدرت، کنترل، مخابرات، امنیت سایبری، مهندسی قابلیت‌اطمینان و سیستم‌های قدرت را به‌صورت هم‌زمان در نظر بگیرد. تنها با چنین رویکردی می‌توان مدارهایی طراحی کرد که علاوه بر عملکرد بالا، از نظر ایمنی، پایداری، امنیت و قابلیت‌اطمینان نیز برای کاربردهای حساس شبکه‌های قدرت مناسب باشند.

۶- روندهای آینده

آینده سیستم‌های قدرت هوشمند مبتنی بر انرژی‌های نو به‌شدت تحت تأثیر پیشرفت‌های مدارهای مجتمع الکترونیک، فناوری‌های نیمه‌هادی، سامانه‌های پردازشی تعبیه‌شده و زیرساخت‌های ارتباطی خواهد بود. با افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر، گسترش ریزشبکه‌ها، توسعه خودروهای الکتریکی، رشد سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی و نیاز روزافزون به بهره‌برداری هوشمند از شبکه، نقش مدارهای مجتمع از یک جزء پشتیبان به یک عنصر راهبردی در طراحی و کنترل سیستم‌های قدرت تبدیل می‌شود. در آینده، تراشه‌ها نه‌تنها وظیفه اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها را بر عهده خواهند داشت، بلکه در تصمیم‌گیری محلی، تشخیص خطا، پیش‌بینی رفتار شبکه، افزایش امنیت سایبری و هماهنگی میان اجزای مختلف شبکه نیز نقش مستقیم ایفا خواهند کرد.

یکی از مهم‌ترین روندهای آینده، توسعه تراشه‌های کم‌مصرف و فوق‌کم‌مصرف برای حسگرها، کنتورهای هوشمند، تجهیزات لبه شبکه و سامانه‌های اینترنت اشیای انرژی است. در شبکه‌های قدرت آینده، تعداد زیادی از حسگرها و گره‌های اندازه‌گیری در نقاط مختلف شبکه نصب خواهند شد تا اطلاعاتی مانند ولتاژ، جریان، توان، دما، وضعیت تجهیزات، کیفیت توان و شرایط محیطی را به‌صورت پیوسته جمع‌آوری کنند. بسیاری از این تجهیزات در مکان‌های دورافتاده یا با دسترسی محدود نصب

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

می‌شوند و ممکن است از منابع تغذیه محدود یا انرژی برداشت‌شده از محیط استفاده کنند. بنابراین، طراحی مدارهای مجتمع با مصرف توان بسیار پایین، قابلیت کارکرد طولانی‌مدت و پایداری بالا اهمیت زیادی خواهد داشت. چنین تراشه‌هایی می‌توانند امکان پایش گسترده، ارزان و پایدار را در شبکه‌های هوشمند فراهم کنند.

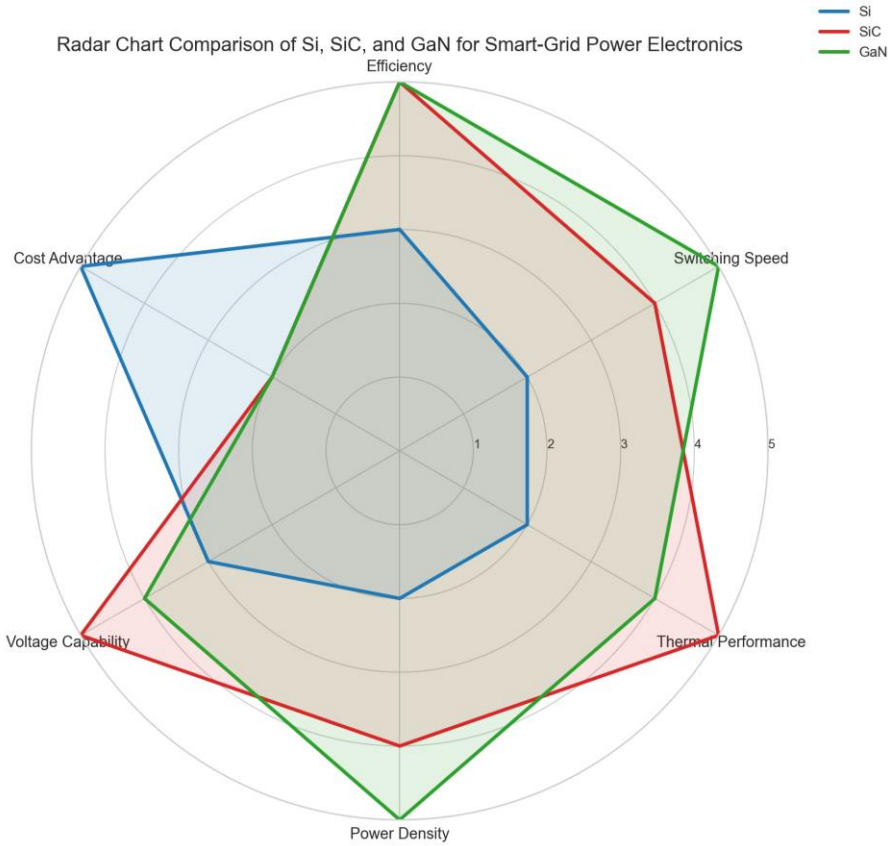
روند مهم دیگر، استفاده گسترده‌تر از نیمه‌هادی‌های شکاف باند پهن مانند SiC و GaN در مبدل‌های الکترونیک قدرت است. این مواد نسبت به نیمه‌هادی‌های سیلیکونی متداول، تحمل ولتاژ بالاتر، تلفات کمتر، سرعت کلیدزنی بیشتر و عملکرد بهتر در دماهای بالا دارند. به‌کارگیری کلیدهای قدرت مبتنی بر SiC و GaN در اینورترهای خورشیدی، مبدل‌های توربین بادی، شارژرهای سریع خودروهای الکتریکی و سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند باعث افزایش بازده، کاهش حجم تجهیزات، کاهش نیاز به سامانه‌های خنک‌کننده و بهبود پاسخ دینامیکی شود. در کنار این فناوری‌ها، مدارهای مجتمع راه‌انداز گیت، مدارهای حفاظتی و کنترل‌کننده‌های پرسرعت نیز باید متناسب با ویژگی‌های این کلیدهای پیشرفته توسعه یابند.

همانطور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، ویژگی‌های عملکردی دستگاه‌های قدرت سیلیکون، سیلیکون کاربید و گالیوم نیترید بر اساس پارامترهای عملیاتی حیاتی مقایسه شده‌اند. دستگاه‌های سیلیکونی، در حالی که در حال حاضر بالاترین سطح بلوغ تجاری و مقرون به صرفه بودن را دارند، محدودیت‌های قابل توجهی در سوئیچینگ فرکانس بالا و مدیریت حرارتی نشان می‌دهند، همانطور که با نمرات پایین‌تر آنها در عملکرد حرارتی و معیارهای سرعت سوئیچینگ نشان داده شده است. در مقابل، نیمه‌هادی‌های با شکاف باند وسیع (WBG) مزایای تحول‌آفرینی ارائه می‌دهند. سیلیکون کاربید دارای رتبه‌بندی ولتاژ و پایداری حرارتی برتر است و آن را به کاندیدای ترجیحی برای کاربردهای صنعتی با قدرت بالا و سطح شبکه تبدیل می‌کند. در مقابل، گالیوم نیترید سرعت سوئیچینگ و چگالی توان استثنایی را نشان می‌دهد و آن را به عنوان راه حل بهینه برای مبدل‌های قدرت هوشمند با فرکانس بالا و الکترونیک قدرت فشرده قرار می‌دهد. این تجزیه و تحلیل بده بستان نشان می‌دهد که انتخاب ماده نیمه‌هادی مناسب به شدت به محدودیت‌های خاص سیستم قدرت هوشمند، مانند الزامات فرکانس سوئیچینگ در مقابل قابلیت‌های مدیریت ولتاژ، وابسته است.

یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در سطح سخت‌افزار نیز از روندهای کلیدی آینده محسوب می‌شود. با پیچیده‌تر شدن شبکه‌های قدرت و افزایش عدم‌قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای پیش‌بینی تولید، پیش‌بینی بار، تشخیص خطا، مدیریت انرژی، کنترل تطبیقی و بهینه‌سازی بهره‌برداری ضروری خواهد بود. اجرای این الگوریتم‌ها صرفاً در مراکز پردازش ابری ممکن است به دلیل تأخیر ارتباطی، محدودیت پهنای باند و الزامات بلادرنگ کافی نباشد. ازاین‌رو، توسعه تراشه‌های هوش مصنوعی، شتاب‌دهنده‌های یادگیری ماشین و پردازنده‌های لبه می‌تواند امکان تصمیم‌گیری سریع و محلی را در تجهیزات شبکه فراهم کند. برای مثال، یک کنترل‌کننده مبتنی بر AI می‌تواند در داخل اینورتر یا رله حفاظتی قرار گیرد و بر اساس داده‌های لحظه‌ای، وضعیت شبکه را تحلیل کرده و پاسخ مناسب را بدون وابستگی کامل به مرکز کنترل صادر کند [۱۰۵-۱۰۲]. گسترش سامانه‌های روی تراشه یا SoC نیز نقش مهمی در آینده تجهیزات هوشمند شبکه خواهد داشت. در معماری‌های سنتی، عملکردهایی مانند اندازه‌گیری، پردازش، کنترل، ارتباطات و امنیت معمولاً توسط قطعات جداگانه انجام می‌شدند. اما با پیشرفت فناوری ساخت تراشه، امکان ترکیب این عملکردها در یک تراشه واحد فراهم شده است. SoCها می‌توانند شامل مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، پردازنده دیجیتال سیگنال، واحدهای کنترل بلادرنگ، ماژول‌های مخابراتی، حافظه، واحدهای رمزنگاری و مدارهای مدیریت توان باشند. این یکپارچه‌سازی باعث کاهش ابعاد، کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت تبادل داده، کاهش هزینه مونتاژ و بهبود قابلیت‌اطمینان سامانه می‌شود. چنین تراشه‌هایی برای کنتورهای هوشمند، کنترل‌کننده‌های اینورتر، واحدهای مدیریت باتری، تجهیزات حفاظتی و گره‌های اینترنت اشیای انرژی بسیار کاربردی خواهند بود [۱۰۸-۱۰۶]. توسعه حسگرهای هوشمند و اینترنت اشیای انرژی از دیگر روندهای مهم آینده است. اینترنت اشیای انرژی به شبکه‌ای از تجهیزات متصل اشاره دارد که می‌توانند داده‌های انرژی را جمع‌آوری، تحلیل و مبادله کنند. در چنین ساختاری، حسگرهای هوشمند به کمک مدارهای مجتمع می‌توانند علاوه بر اندازه‌گیری، بخشی از پردازش اولیه داده، فیلترکردن نویز، تشخیص وضعیت غیرعادی و ارسال داده‌های اولویت‌دار را نیز انجام دهند. این موضوع باعث کاهش حجم داده ارسالی، افزایش سرعت واکنش سامانه و بهبود کارایی ارتباطات می‌شود. در آینده، حسگرهای هوشمند نه‌تنها در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

سطح شبکه توزیع، بلکه در پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها، ترانسفورماتورها، شارژرهای خودروهای الکتریکی و تجهیزات خانگی هوشمند نیز به‌کار گرفته خواهند شد.



شکل (۱۵): تحلیل مقایسه‌ای عملکرد مواد نیمه‌هادی قدرت کلیدی. نمودار رادار فناوری‌ها را در شش معیار عملکرد حیاتی ارزیابی می‌کند: راندمان، سرعت سوئیچینگ، عملکرد حرارتی، چگالی توان، ولتاژ نامی و بلوغ تجاری.

Figure (15): Comparative performance analysis of key power semiconductor materials (Si, SiC, and GaN). The radar chart evaluates technologies across six critical performance metrics: Efficiency, switching speed, thermal performance, power density, voltage rating, and commercial maturity.

افزایش نقش تراشه‌های امنیت‌محور نیز برای حفاظت از داده‌ها و زیرساخت شبکه اهمیت زیادی خواهد داشت. با افزایش ارتباطات دیجیتال در شبکه‌های قدرت، خطر حملات سایبری، دستکاری داده‌ها، نفوذ به تجهیزات کنترلی و ارسال فرمان‌های جعلی افزایش می‌یابد. بنابراین، امنیت باید از سطح سخت‌افزار آغاز شود. تراشه‌های آینده احتمالاً به واحدهای رمزنگاری سخت‌افزاری، احراز هویت امن، ذخیره‌سازی محافظت‌شده کلیدهای رمز، بوت امن، تشخیص دستکاری فیزیکی و مکانیزم‌های مقابله با حملات کانال جانبی مجهز خواهند شد. استفاده از این تراشه‌ها می‌تواند امنیت کنتورهای هوشمند، رله‌های حفاظتی، کنترل‌کننده‌های ریزشبکه، اینورترها و تجهیزات ارتباطی را افزایش دهد و از اختلال در عملکرد زیرساخت‌های حیاتی جلوگیری کند.

در نهایت، حرکت به‌سوی معماری‌های ماژولار و مقیاس‌پذیر در ریزشبکه‌ها، نیروگاه‌های پراکنده و سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر از دیگر مسیرهای آینده است. با افزایش تعداد منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای قابل کنترل، طراحی سامانه‌هایی که بتوانند به‌سادگی توسعه یابند و با شرایط مختلف سازگار شوند اهمیت زیادی دارد. مدارهای مجتمع قابل برنامه‌ریزی، کنترل‌کننده‌های ماژولار، تراشه‌های ارتباطی استاندارد و واحدهای پردازشی لبه می‌توانند امکان توسعه انعطاف‌پذیر ریزشبکه‌ها را فراهم کنند. در چنین معماری‌هایی، هر واحد انرژی مانند پنل خورشیدی، توربین بادی، باتری یا بار هوشمند می‌تواند دارای کنترل‌کننده محلی مبتنی بر IC باشد و در عین حال با سامانه مدیریت انرژی مرکزی هماهنگ شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

به‌طور کلی، روندهای آینده نشان می‌دهند که مدارهای مجتمع الکترونیک نقش محوری‌تری در شکل‌دهی نسل بعدی سیستم‌های قدرت هوشمند خواهند داشت. این مدارها با ترکیب پردازش بلادرنگ، هوش مصنوعی، ارتباطات امن، مصرف توان پایین و قابلیت‌اطمینان بالا، زمینه را برای ایجاد شبکه‌هایی انعطاف‌پذیرتر، هوشمندتر، امن‌تر و سازگارتر با منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌کنند. در نتیجه، پیشرفت در حوزه طراحی و ساخت مدارهای مجتمع را می‌توان یکی از عوامل کلیدی در تحقق شبکه‌های انرژی پایدار و هوشمند آینده دانست.

۷- نتیجه‌گیری

مدارهای مجتمع الکترونیک، از نقش یک جزء منفرد به ستون فقرات اصلی سیستم‌های قدرت هوشمند و منابع انرژی نو تبدیل شده‌اند. همگرایی فناوری‌های دیجیتال، مخابراتی، و قدرت در سطح تراشه، امکان تحقق عملکردهایی را فراهم آورده است که پیش از این دست‌یافتنی نبودند؛ از پایش بلادرنگ و دقیق پارامترهای شبکه گرفته تا کنترل هوشمند مبدل‌های الکترونیک قدرت، حفاظت تطبیقی و مدیریت انرژی پویا. این مقاله مروری، نقش حیاتی مدارهای مجتمع را در این تحول نشان داد و چگونگی توانمندسازی شبکه‌های قدرت برای ادغام مؤثرتر منابع تجدیدپذیر، افزایش پایداری، بهبود کیفیت توان و ارتقاء امنیت سایبری را تشریح کرد.

همانطور که در بخش‌های پیشین مطرح شد، مدارهای مجتمع به اجزای ضروری در بخش‌های مختلف سیستم قدرت هوشمند تبدیل شده‌اند. در اندازه‌گیری و پایش هوشمند، تراشه‌های دقیق و با سرعت بالا امکان ثبت و تحلیل لحظه‌ای وضعیت شبکه را فراهم می‌کنند. در کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، مدارهای مجتمع با اجرای الگوریتم‌های پیچیده مانند MPPT و کنترل توان راکتیو، بازده و پایداری منابع انرژی نو را به حداکثر می‌رسانند. حفاظت و تشخیص خطا با کمک واحدهای پردازشی سریع و الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر IC، دقت و سرعت شناسایی و ایزوله‌سازی خطاها را افزایش داده و از اختلال در شبکه جلوگیری می‌کنند. مدیریت انرژی و تصمیم‌گیری هوشمند با استفاده از ریزکنترل‌گرها و پردازنده‌های تعبیه‌شده، هماهنگی بهینه بین تولید، ذخیره‌سازی و مصرف را امکان‌پذیر می‌سازد. ارتباطات و تبادل داده نیز با تراشه‌های مخابراتی پرسرعت و امن، ستون فقرات تبادل اطلاعات در شبکه‌های توزیع‌شده و پراکنده را تشکیل می‌دهند.

علاوه بر این، چالش‌های مهمی مانند شرایط محیطی سخت، امنیت سایبری، هزینه‌های طراحی و قابلیت‌اطمینان بلندمدت، مسیر توسعه و به‌کارگیری مدارهای مجتمع در این حوزه را هموارتر می‌سازند. غلبه بر این چالش‌ها نیازمند نوآوری مستمر در مواد، معماری‌های تراشه، روش‌های آزمون و استانداردهای امنیتی است.

نگاه به آینده، نشان‌دهنده نقش فزاینده مدارهای مجتمع در شکل‌دهی به اکوسیستم انرژی پایدار و هوشمند است. توسعه تراشه‌های فوق‌کم‌مصرف برای اینترنت اشیای انرژی، به‌کارگیری گسترده نیمه‌هادی‌های شکاف باند وسیع مانند SiC و GaN برای افزایش بازده مبدل‌ها، و یکپارچه‌سازی عمیق‌تر هوش مصنوعی در سطح سخت‌افزار، از جمله روندهایی هستند که چشم‌انداز این حوزه را روشن‌تر می‌کنند. سامانه‌های روی تراشه با ادغام قابلیت‌های اندازه‌گیری، کنترل، ارتباطات و امنیت، به ساده‌سازی طراحی و کاهش هزینه تجهیزات هوشمند کمک خواهند کرد. همچنین، تمرکز بر امنیت سخت‌افزاری و توسعه معماری‌های ماژولار و مقیاس‌پذیر، زیرساخت‌های انرژی آینده را در برابر تهدیدات سایبری مقاوم‌تر و انعطاف‌پذیرتر خواهد ساخت.

در نهایت، موفقیت در ادغام موفقیت‌آمیز انرژی‌های نو در شبکه‌های قدرت، مستلزم همکاری نزدیک میان پژوهشگران، مهندسان طراح تراشه، تولیدکنندگان تجهیزات قدرت و اپراتورهای شبکه است. با درک عمیق‌تر از تعامل میان مدارهای مجتمع و نیازمندی‌های سیستم‌های قدرت، می‌توانیم به سمت شبکه‌های انرژی پایدارتر، مطمئن‌تر، ایمن‌تر و اقتصادی‌تر گام برداریم که قادر به پاسخگویی به نیازهای رو به رشد جامعه جهانی و حفاظت از محیط زیست باشند. مدارهای مجتمع الکترونیک، بدون شک، نقش کلیدی در تحقق این چشم‌انداز ایفا خواهند کرد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

سپاسگزاری

از داوران محترم، حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی و همکاران محترم نشریه که در نشر و چاپ این مقاله کمک نمودند، صمیمانه سپاسگزارم.

References

مراجع

[1] M. Riahinasab, M. Moazzami, S.M. Zanjani, N. Behzadfar, A. Golsorkhi-Esfahani, "Load frequency control system in power grid with gas turbine power plant: Stability analysis for parameter changes", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 1, pp. 13-21, June 2024.

[2] F. Ostovar, H. Barati, S.S. Mortazavi, "Multi-objective allocation of distributed generation resources and capacitor banks based on a two-stage fuzzy method and ε-constrained optimization", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 8, no. 3, pp. 73-94, Sept. 2024, https://doi.org/10.30495/SPRE.2024.1128320.

[3] G. Shahgholian, M. Moazzami, S.M. Zanjani, A. Mosavi, A. Fathollahi, "A hydroelectric power plant brief: Classification and application of artificial intelligence", Proceeding of the IEEE/SACI, pp. 000141-000146, Timisoara, Romania, May 2023, https://doi.org/10.1109/SACI582-69.2023.10158597.

[4] M.R. Moradian, M. Moazzami, G. Shahgholian, "Analysis and simulation of dynamic behavior of load frequency control for a thermal–hydro power system with photovoltaic system", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 13, no. 2, pp. 36-47, Sept. 2024.

[5] S. Madanian, S.M.A. Zanjani, "Investigating methods of electronic waste management and recycling of ever-increasing electronic wastes with emphasis on eco-friendly processes", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 41, pp. 61-71, June 2020, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1399.11.41.5.4.

[6] G. Shahgholian, S.M.A. Zanjani, "A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023, https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.3.4.

[7] A. Riad, M.B. Zohra, A. Alhamany, M. Mansouri, "Bio-sun tracker engineering self-driven by thermo-mechanical actuator for photovoltaic solar systems", Case Studies in Thermal Engineering, vol. 21, Article Number: 100709, Oct. 2020, https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100709.

[8] J.M. Luis-Ruiz, B.R. Salas-Menocal, R. Pereda-García, R. Pérez-Álvarez, J. Sedano-Cibrián, C. Ruiz-Fernández, "Optimal location of solar photovoltaic plants using geographic information systems and multi-criteria analysis", Sustainability, vol. 16, no. 7, Article number: 2895, March 2024, https://doi.org/10.3390/su16072895.

[9] G. Shahgholian, S.M.A. Zanjani, "A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023, https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.3.4.

[10] H. Ghaedi, G. Shahgholian, M. Hashemi. "Comparison of the effects of two flatness based control methods for STATCOM on improving stability in power systems including DFIG based wind farms", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, vol. 8, no. 15, pp. 81-90, 2019, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0.

[11] M. Hashemi, G. Shahgholian, M. Riahinasab, E. Hosseini, "Analysis of the impact of energy storage system on frequency regulation stability in hydrothermal power system using state space modeling", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 13, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2026, https://doi.org/10.22104/hfe.2025.7384.1342.

[12] M.Y.A. Khan, H. Liu, J. Wang, R. Zhang, Y. Zhang, "Hierarchical control framework for offshore hybrid ac/dc microgrid integrating renewable energy resources and hybrid energy storage system", Journal of Energy Storage, vol. 152, Article Number: 120749, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.est.2026.120749.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

[13] S.M. Zanjani, M. Moazzami, M.A. Honarvar, "Analysis and simulation of the static synchronous compensation effect in the distribution system with wind farms based on SCIG", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 17-32, June 2023, https://doi.org/10.30495/SPRE.2023.1055998.

[14] A. Barani, M. Moazzami, M.A. Honarvar, S.M.A. Zanjani, "Decentralized robust adaptive control based on dynamic programming for SVC complement controller design", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 11, no. 1, pp. 41-48, March 2022, https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519246.2022.11.1.6.2.

[15] E.S. Lakatos, S. Ferenci, L. Szabó, "Sustainability paradoxes in AI-enabled decentralized energy systems: Opportunities, risks, and systemic traps", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 239, Article Number: 117152, Oct. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117152.

[16] Y. Devarajan, R. Thandavamoorthy, M.V. Jain, V. Bramaramba, S. Samantaray, A. Anand, M. Vichitra, K. Mehar, "Digital twin and artificial intelligence–driven optimization for renewable-dominated energy systems: a system-level integration framework", Energy Conversion and Management: X, vol. 31, Article Number: 102010, Sept. 2026, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.102010.

[17] T. He, H. Xie, H.H. Goh, X. Liang, W.K. Yew, D. Zhang, W. Dai, T.A. Kurniawan, Y.S. Lim, H.Y. Wong, M.T. Islam, "Advanced sensing and holistic perception technologies for new-type power systems: A comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 223, Article Number: 116023, Nov. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116023.

[18] M.U. Saleem, M. Shakir, M.R. Usman, M.H.T. Bajwa, N. Shabbir, P.S. Ghahfarokhi, K. Daniel, "Integrating smart energy management system with internet of things and cloud computing for efficient demand side management in smart grids", Energies, vol. 16, no. 12, Article Number: 4835, June 2023, https://doi.org/10.3390/en16124835.

[19] G. Rajendran, R. Raute, C. Caruana, "The brain behind the grid: A comprehensive review on advanced control strategies for smart energy management systems", Energies, vol. 18, no. 15, Article Number: 3963, July 2025, https://doi.org/10.3390/en18153963.

[20] Y.M. Banad, S.S. Sharif, Z. Rezaei, "Artificial intelligence and machine learning for smart grids: from foundational paradigms to emerging technologies with digital twin and large language model-driven intelligence", Energy Conversion and Management: X, vol. 28, Article Number: 101329, Oct. 2025, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101329.

[21] M.I. El-Afifi, B.E. Sedhom, S. Padmanaban, A.A. Eladl, "A review of IoT-enabled smart energy hub systems: Rising, applications, challenges, and future prospects", Renewable Energy Focus, vol. 51, Article Number: 100634, Oct. 2024, https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100634.

[22] M.U. Saleem, M.R. Usman, M. Shakir, "Design, implementation, and deployment of an IoT based smart energy management system", IEEE Access, vol. 9, pp. 59649-59664, April 2021, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070960.

[23] P.D. Leo, G. Malgaroli, F. Spertino, A. Ciocia, "Renewable energy integration in emerging electricity grids: Technologies, challenges, and system-level perspectives", Applied Sciences, vol. 16, no. 10, Article Number: 5124, May 2026, https://doi.org/10.3390/app16105124.

[24] R. Haghighi, V.H. Bui, M. Wang, W. Su, "Survey of reliability challenges and assessment in power grids with high penetration of inverter-based resources", Energies, vol. 17, no. 21, Article Number: 5352, Oct. 2024, https://doi.org/10.3390/en17215352.

[25] A.N. Sheta, B.E. Sedhom, A.A. Eladl, V. Bureš, M.I. El-Afifi, "Cybersecurity challenges in integrated energy systems with cyber-physical integration: A review", Energy Strategy Reviews, vol. 64, Article Number: 102159, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.esr.2026.102159.

[26] R.R. Sarangi, P.K. Ray, A. Mohanty, S. Khadem, S. Patra, "Enhancing DC microgrid security: A comprehensive review of protection challenges and solutions", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 168, Article Number: 110687, July 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110687.

[27] Z.J. Shen, G. Sabui, Z. Miao, Z. Shuai, "Wide-bandgap solid-state circuit breakers for dc power systems: Device and circuit considerations", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 62, no. 2, pp. 294-300, Feb. 2015, https://doi.org/10.1109/TED.2014.2384204.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

[28] T. Wei, H. Li, J. Miao, "Integration and development path of smart grid technology: technology-driven, policy framework and application challenges", Processes, vol. 13, no. 8, Article Number: 2428, July 2025, https://doi.org/10.3390/pr13082428.
[29] J. Etedali, M. Moazzami, G. Shahgholian, M. Samiei-Moghaddam, M.R. Moradian, "Three-level stochastic optimization framework for energy management in smart grids with integrated peer-to-peer trading", Energy Conversion and Management: X, vol. 30, Article Number: 101784, April 2026, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101784.
[30] M. Ghiasi, Z. Wang, M. Mehrandezh, S. Jalilian, N. Ghadimi, "Evolution of smart grids towards the Internet of energy: Concept and essential components for deep decarbonisation", IET Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 86-102, Des. 2023, https://doi.org/10.1049/stg2.12095.
[31] D.K. Panda, S. Das, "Smart grid architecture model for control, optimization and data analytics of future power networks with more renewable energy", Journal of Cleaner Production, vol. 301, Article Number: 126877, June 2021, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126877.
[32] M.A. Fkirin, Z.M. Gowaly, E.A. Elsheikh, "Dynamic controller design for maximum power point tracking control for solar energy systems", Technologies, vol. 13, no. 2, Article Number: 71, Feb. 2025, https://doi.org/10.3390/technologies13020071.
[33] M.K. Kolamroudi, O.H. Jaiyeoba, M. Ilkan, B. Safaei, "A comprehensive review on the artificial intelligence for the development of thermal concentrating photovoltaic systems", Solar Energy, vol. 301, Article Number: 113937, Nov. 2025, https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113937.
[34] S.H. Mozafarpoor-Khoshrodi, G. Shahgholian, "Improvement of perturb and observe method for maximum power point tracking in wind energy conversion system using fuzzy controller", Energy Equipment and Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 111-122, Dec. 2016, https://doi.org/10.22059/EES.2016.23031.
[35] M. Mahdavian, N. Wattanapongsakorn, G. Shahgholian, S.H. Mozafarpoor, M. Janghorbani, S.M. Shariatmadar, "Maximum power point tracking in wind energy conversion systems using tracking control system based on fuzzy controller", IEEE/ECTICON, pp. 1-5, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 2014, https://doi.org/10.1109/ECTICon.2014.6839750.
[36] O. Bamisile, D. Cai, H. Adun, M. Taiwo, J. Li, Y.Hu, Q. Huang, "Geothermal energy prospect for decarbonization, EWF nexus and energy poverty mitigation in East Africa, the role of hydrogen production", Energy Strategy Reviews, vol. 49, Article Number: 101157, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101157.
[37] S.A. Abdollahi, S. Faramarzi, M. Mafi, S.F. Ranjbar, S.M. Sofiani, "Proposing a hydrogen liquefaction cycle for geothermal energy storage in an innovative multi-generation system", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 12, no. 1, pp. 1-8, Jan. 2025, https://doi.org/10.22104/hfe.2024.7096.1316.
[38] J.H.I. Ferreira, J.R. Camacho, J.A. Malagoli, "A contribution to the study of the estimate hydroelectric potential for small hydropower plant", IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 7, pp. 3215-3224, July 2016, https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7587623.
[39] D. Borkowski, T. Wegiel, "Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 28, no. 2, pp. 452-459, June 2013, https://doi.org/ 10.1109/TEC.2013.2247605.
[40] A. Johri, V. Verma, M. Basu, "Optimization and Intelligent Control in Hybrid Renewable Energy Systems Incorporating Solar and Biomass", Energy Engineering, vol. 122, no. 5, pp. 1887-1918, April 2025, https://doi.org/10.32604/ee.2025.062355.
[41] N. MacCarty, B. Khiari, S. Jellali, M. Jeguirim, "Social imperatives, technological innovation, and policy transformations to advance the circular economy in biomass energy", Energy for Sustainable Development, vol. 93, Article Number: 102035, Aug. 2026, https://doi.org/10.1016/j.esd.2026.102035.
[42] S. Rasool, K.M. Muttaqi, D. Sutanto, "A multi-filter based dynamic power sharing control for a hybrid energy storage system integrated to a wave energy converter for output power smoothing", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 13, no. 3, pp. 1693-1706, July 2022, https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3170938.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]

[43] S.O. Samb, N. Bernard, M.F. Benkhoris, H.K. Bui, "Design optimization of a direct-drive electrically excited synchronous generator for tidal wave energy", Energies, vol. 15, no. 9, Article Number: 3174, April 2022, https://doi.org/10.3390/en15093174.

[44] D. Singh, A. Muneeb, S. Singh, K. Choksi, A.B. Mirza, F. Luo, "Powering the sea: Challenges and trends in tidal energy integration, power converter technology, and the path forward", in IEEE Access, vol. 13, pp. 187155-187186, Oct. 2025, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3625578.

[45] A. Siddiqui, J. Deese, C. Vermillion, "Recursive gaussian process-based adaptive control of a ducted kite system for tidal energy harvesting", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 31, no. 4, pp. 1949-1956, July 2023, https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3243441.

[46] M.R. Hemmati, S.M.A. Zanjani, E. Yaghoubi, "A new model for enhancing efficiency in on-chip optical networks based on adaptive routing algorithm", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 13, no. 51, no. , pp. 13-22, June 2024, https://doi.org/10.30495/jce.2023.1992434.1216.

[47] S. Yuvaraja, V. Khandelwal, X. Tang, X. Li, "Wide bandgap semiconductor-based integrated circuits", Chip, vol. 2, no. 4, Article Number: 100072, Dec. 2023, https://doi.org/10.1016/j.chip.2023.100072.

[48] M. Hemmati, E. Yaghoubi, S.M.A. Zanjani, M. Dolatshahi, "Providing a routing algorithm in network on chip to reduce energy consumption and increase reliability with fuzzy neural network and genetic programming", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 10, no. 2, pp. 43-51, June 2021, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1400.10.2.5.2.

[49] N. Perentos, R.J. Croft, R.J. McKenzie, I. Cosic, “The alpha band of the resting electroencephalogram under pulsed and continuous radio frequency exposures”, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, vol. 60, no. 6, pp. 1702-1710, June 2013, https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2241059.

[50] V. Kumar, G.H. Hwang, S.S. Park, "Rubber composite for nano-generators and use of artificial intelligence as smart electronic systems: A critical review", Synthetic Metals, vol. 317, Article Number: 118027, Dec. 2026, https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2025.118027.

[51] S. Halder, A.K. Pradhan, S. Mondal, S. Pal, C. Chakraborty, "From mechanical energy harvesting to autonomous electrochromic modulation: A review on nanogenerator-integrated self-powered smart window architectures", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 304, Article Number: 114409, Sept. 2026, https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114409.

[52] A.S. Butt, N. Huda, A.A. Amin, "Design of fault-tolerant control system for distributed energy resources based power network using phasor measurement units", Measurement and Control, vol. 56, no. 1-2, Sept. 2022, https://doi.org/10.1177/00202940221122185.

[53] S.R. Samantaray, I. Kamwa, G. Joos, "Phasor measurement unit based wide area monitoring and information sharing between micro-grids", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 5, pp. 1293-1302, May 2017, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1419.

[54] M.H. Elkholy, H. Metwally, M.A. Farahat, T. Senjyu, M.E. Lotfy, "Smart centralized energy management system for autonomous microgrid using FPGA", Applied Energy, vol. 317, Article Number: 119164, July 2022, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119164.

[55] D. Taheri, G. Shahgholian, M.M. Mirtalaei, "Analysis, design and implementation of a high step-up multi-port non-isolated converter with coupled inductor and soft switching for photovoltaic applications", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 16, no. 17, pp. 3473-3497, Sept. 2022, https://doi.org/10.1049/gtd2.12537.

[56] P.R. Satpathy, V.K. Ramachandaramurthy, S. Padmanaban, "Advanced protection technologies for microgrids: Evolution, challenges, and future trends", Energy Strategy Reviews, vol. 58, Article Number: 101670, March 2025, https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101670.

[57] A.M. Agwa, A.A. El-Fergany, "Protective relaying coordination in power systems comprising renewable sources: Challenges and future insights. Sustainability", vol. 15, no. 9, Article Number: 7279, April 2023, https://doi.org/10.3390/su15097279.

[58] D. Rabie, H. Farzaneh, "A novel modeling framework for demand response-based energy management systems in smart electricity markets, using optimization and multi-criteria decision

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

making techniques", Applied Energy, vol. 405, Article Number: 127228, Feb. 2026, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127228.
[59] J. Olano, H. Camblong, J.A. López-Ibarra, T.T. Lie, "Development of energy management systems for electric vehicle charging stations associated with batteries: Application to a real case", Applied Sciences, vol. 15, no. 16, Article Number: 8798, Aug. 2025, https://doi.org/10.3390/app15168798.
[60] M. Zhang, L. Ming, "Issues of stability and control in power electronics-based energy storage systems: Critical review and methodological extensions of large-scale ac and dc power networks", Chemical Engineering Journal, vol. 536, Article Number: 175872, May 2026, https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175872.
[61] M.M. Zadeh, M. Toulabi, T. Amraee, S.M.T. Bathaee, "Enhancing frequency control in island microgrids with low inertia using variable inertia flywheels and battery energy storage systems", Electric Power Systems Research, vol. 253, Article Number: 112519, April 2026, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112519.
[62] D. Hortelano, I. Miguel, R.J.D. Barroso, J.C. Aguado, N. Merayo, L. Ruiz, A. Asensio, X. Masip-Bruin, P. Fernández, R.M. Lorenzo, E.J. Abril, "A comprehensive survey on reinforcement-learning-based computation offloading techniques in edge computing systems", Journal of Network and Computer Applications, vol. 216, Article Number: 103669, July 2023, https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103669.
[63] S. Liang, S. Jin, Y. Chen, "A review of edge computing technology and its applications in power systems", Energies, vol. 17, no. 13, Article Number: 3230, July 2024, https://doi.org/10.3390/en17133230.
[64] S. Douch, M.R. Abid, K. Zine-Dine, D. Bouzidi, D. Benhaddou, "Edge computing technology enablers: A systematic lecture study", IEEE Access, vol. 10, pp. 69264-69302, June 2022, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183634.
[65] A. Cakin, S. Dilek, S. Tosun, "Energy-aware application mapping methods for mesh-based hybrid wireless network-on-chips", Journal Supercomput, vol. 80, pp. 15582–15612, July 2024, https://doi.org/10.1007/s11227-024-06062-4.
[66] M. Sacanamboy, "Heuristic algorithm for task mapping problem in a hierarchical wireless network-on-chip architecture", Cluster Computing, vol. 27, pp. 159–175, Feb. 2024, https://doi.org/10.1007/s10586-022-03919-2.
[67] J.C. Rodriguez, F. Grijalva, M. García, D.E.C. Barragán, B.A.A. Acurio, H. Carvajal, "Wireless communication technologies for smart grid distribution networks", Engineering Proceedings, vol. 47, no. 1, Article number: 7, Dec. 2023, https://doi.org/10.3390/engproc2023047007.
[68] H. Liang, B. J. Choi, A. Abdrabou, W. Zhuang, X. Shen, "Decentralized economic dispatch in microgrids via heterogeneous wireless networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, no. 6, July 2012.
[69] F.E. Abrahamsen, Y. Ai, M. Cheffena, "Communication technologies for smart grid: A comprehensive survey", Sensors, vol. 21, no. 23, Article Number: 8087, Dec. 2021, https://doi.org/10.3390/s21238087.
[70] N. Suhaimy, N.A.M. Radzi, W.S.H.M.W. Ahmad, K.H.M. Azmi, M.A. Hannan, "Current and future communication solutions for smart grids: A review", IEEE Access, vol. 10, pp. 43639-43668, April 2022, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3168740.
[71] S.J. Yeboah, S. Nunoo, J.C. Attachie, W.D. Asihene, E.Y. Asuamah, "Impact and integration techniques of renewable energy sources on smart grid operations: A systematic review", Scientific African, vol. 29, Article Number: e02845, Sept. 2025, https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02845.
[72] Q. Hassan, S. Algburi, A.Z. Sameen, H.M. Salman, M. Jaszczur, "A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications", Results in Engineering, vol. 20, Article Number: 101621, Dec. 2023, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621.
[73] M.S. Endiz, A.E. Coşgun, H. Demir, M.Z. Erel, I. Çalıkuşu, E.B. Kılınç, A. Taş, M.K. Gökkuş, G. Gökkuş, "Renewable energy applications across engineering disciplines: A comprehensive review", Applied Sciences, vol. 16, no. 8, Article Number: 3949, April 2026, https://doi.org/10.3390/app16083949.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]

[74] C.P. Ohanu, S.A. Rufai, U.C. Oluchi, "A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration", Heliyon, vol. 10, no. 3, Article Number: e25705, Feb. 2024, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705.
[75] A. Triki-Lahiani, A.B.B. Abdelghani, I. Slama-Belkhodja, "Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 2680-2692, Feb. 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.101.
[76] K. Ullah, A.B. Awan, M. Ishaq, A.M. Soomar, "MPPT control strategies for grid-connected photovoltaic systems: A comparative review based on key parameters", Energies, vol. 19, no. 12, Article Number: 2866, June 2026, https://doi.org/10.3390/en19122866.
[77] D. Kumar, K. Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 55, pp. 957–970, March 2016, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.013.
[78] S. Tamalouzt, K.F. Sayeh, K. Djermouni, Y. Belkhier, A. Hamasse, "Control, reliability analysis, and intelligent energy management optimization for resilient multi-pump irrigation system powered by DFIG-based wind energy system", Results in Control and Optimization, Article Number: 100668, Feb. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rico.2026.100668.
[79] M. Ullah, Y. Guan, A. Asim, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, "Fault ride-through capability enhancement of DFIG-based wind power plants using BESS-STATCOM", IEEE Access, vol. 14, pp. 56026-56044, April 2026, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3682236.
[80] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim, C.W. Tan, R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 5, pp. 3220-3227, June 2012, https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.016.
[81] D. Arivalagan, O. Vignesh, S.S. Abinayaa, V.S. Nishok, "Advanced fault diagnosis in analog and digital VLSI circuits utilizing multi-anchor space-aware temporal convolutional neural network for efficient circuit reliability assessment", Integration, vol. 107, Article Number: 102631, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2025.102631.
[82] C. Biswal, P.K. Rout, B.K. Sahu, M. Mishra, "Fault detection and assessment in an AC microgrid system using modified complex plane via positive sequence current measurement", Results in Engineering, vol. 26, Article Number: 104812, June 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104812.
[83] G. Magdy, A. Bakeer, M. Alhasheem, "Superconducting energy storage technology-based synthetic inertia system control to enhance frequency dynamic performance in microgrids with high renewable penetration", Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 6, no. 4, Article Number: 36, Oct. 2021, https://doi.org/10.1186/s41601-021-00212-z.
[84] M.S. Mastoi, D. Wang, X. Zhou, X. He, M. Hassan, A. Ali, A. Rehman, "Study of energy storage technology approaches for mitigating wind power fluctuations to enhance smart grid resilience", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 224, Article Number: 116072, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116072.
[85] M. Ahmadi, H. Aly, J. Gu, "A comprehensive review of AI-driven approaches for smart grid stability and reliability", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 226, Article Number: 116424, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116424.
[86] N. Hinov, "Smart energy systems based on next-generation power electronic devices", Technologies, vol. 12, no. 6, Article Number: 78, June 2024, https://doi.org/10.3390/technologies12060078.
[87] G. Rajendran, R. Raute, C. Caruana, "A comprehensive review of solar PV integration with smart-grids: challenges, standards, and grid codes", Energies, vol. 18, no. 9, Article Number: 2221, April 2025, https://doi.org/10.3390/en18092221.
[88] A.I.A. Anil, M.R.A. Muttaki, S. Afrin, S. Hasan, "The next generation of energy storage for smart and sustainable power grids: A systematic review", Energy Conversion and Management: X, vol. 30, Article Number: 101771, May 2026, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101771.
[89] J. Sun, Z. Peng, D. Liu, Z. Chen, Y. Li, A. Wang, Z. Jiao, X. Yao, "A review of overvoltage protection technologies and protective devices for wind turbines", Energies, vol. 19, no. 11, Article Number: 2704, June 2026, https://doi.org/10.3390/en19112704.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

[90] P. Parvizi, M. Jalilian, A.M. Amidi, M.R. Zangeneh, J.R. Riba, "Technical losses in power networks: Mechanisms, mitigation strategies, and future directions", Electronics, vol. 14, no. 17, Article Number: 3442, Aug. 2025, https://doi.org/10.3390/electronics14173442.
[91] R. Aalund, V.P. Paglioni, "Enhancing reliability in embedded systems hardware: A literature survey", IEEE Access, vol. 13, pp. 17285-17302, Jan. 2025, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3534138.
[92] M.U. Saleem, M.R. Usman, M.A. Usman, C. Politis, "Design, deployment and performance evaluation of an IoT based smart energy management system for demand side management in smart grid", IEEE Access, vol. 10, pp. 15261-15278, Jan. 2022, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3147484.
[93] M. Güçyetmez, H.S. Farhan, "Enhancing smart grids with a new IOT and cloud-based smart meter to predict the energy consumption with time series", Alexandria Engineering Journal, vol. 79, pp. 44-55, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.071.
[94] Z. Yu, Z. Zhang, S. Zeadally, "Energy-efficient task offloading in the industrial internet of things: A Lyapunov-guided multi-agent deep reinforcement learning approach", Journal of Industrial Information Integration, vol. 50, Article Number: 101037, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.101037.
[95] A.O. Muhammed, M.S.E. Moursi, N. Hatziargyriou, "Review of deep learning techniques applications in modern power systems stability and cyber security", Applied Energy, vol. 402, Article Number: 126927, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126927.
[96] M. Bouslimani, F.B. Tayeb, Y. Amirat, M. Benbouzid, "Cyber-physical security in smart grids: A comprehensive guide to key research areas, threats, and countermeasures", Applied Sciences, vol. 15, no. 23, Article Number: 12367, Nov. 2025, https://doi.org/10.3390/app152312367.
[97] M.A. Sheba, D.E.A. Mansour, N.H. Abbasy, "A new low-cost and low-power industrial internet of things infrastructure for effective integration of distributed and isolated systems with smart grids", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 17, no. 20, pp. 4554-4573, Oct. 2023, https://doi.org/10.1049/gtd2.12951.
[98] M. Jali, S.M.A. Zanjani, M. Dolatshahi, B. Barekatain, "A novel low-power and stable 10 CNFET SRAM cell with differential write and single-ended decoupled read operations", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 198, Article Number: 155847, Aug. 2025, https://doi.org/10.1016/j.aeue.2025.155847.
[99] S.M.A. Zanjani, M. Parvizi, "Design and simulation of a bulk driven operational transconductance amplifierbased on CNTFET technology", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 45, pp. 65-76, June 2021.
[100] S.S. Reka, T. Dragicevic, "Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 91, pp. 90-108, Aug. 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.089.
[101] N.S. Silva, R. Castro, P. Ferrão, "Smart grids in the context of smart cities: A literature review and gap analysis", Energies, vol. 18, no. 5, Article Number: 1186, Feb. 2025, https://doi.org/10.3390/en18051186.
[102] A. Uzorka, D. Kibirige, D. Makumbi, "Smart renewable energy systems: The role of artificial intelligence in enhancing efficiency and reliability", Sustainable Energy Research , vol. 13, Article Number: 19, June 2026, https://doi.org/10.1186/s40807-026-00253-8.
[103] S. Krishnamurthy, O.B. Adewuyi, S.A. Salimon, "Recent advances in artificial intelligence-based optimization for power system applications: A review of techniques, challenges, and future directions", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 226, Article Number: 116340, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116340.
[104] D. Chen, J. Jiang, N. Hayes, Z. Su, G.W. Wei, "Artificial intelligence approaches for anti-addiction drug discovery", Digital Discovery, vol. 4, no. 6, pp. 1404-1416, April 2025, https://doi.org/10.1039/d5dd00032g.
[105] M. Bilal, A.A. Algethami, Imdadullah, S. Hameed, "Review of computational intelligence approaches for microgrid energy management", IEEE Access, vol. 12, pp. 123294-123321, Aug. 2024, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3440885.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

[106] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsawah, J. Zhu, J.M. Guerrero, "Microgrids: A review, outstanding issues and future trends", Energy Strategy Reviews, vol. 49, Article Number: 101127, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127.

[107] K. Salitha, H.A. Vidya, J. Ramprabhakar, "Advancement of power electronic converter and control methods in microgrid systems: A review", IEEE Access, vol. 14, pp. 4402-4434, Jan. 2026, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3650614.

[108] S. Kumar, M. Premkumar, J. Giri, S.S. Sharma, S.M.M. Hasnain, T. Sathish, R. Zairov, "Exploring the spectrum: A comprehensive review of control methods in microgrid systems", Results in Engineering, vol. 28, Article Number: 105470, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105470.

زیرنویس‌ها:

[1] Renewable Energy Sources
[2] Energy Storage Systems
[3] Smart Grid
[4] Integrated Circuits
[5] Condition Monitoring
[6] Integrated Chip-Based Sensors
[7] Big Data
[8] Wide Band Gap
[9] Systems on a Chip
[10] Power Layer
[11] Communication Layer
[12] Control Layer
[13] Solar Energy
[14] Wind Energy
[15] Geothermal Energy
[16] Small Hydropower
[17] Biomass Energy
[18] Wave Energy
[19] Tidal Energy
[20] Intermittency
[21] Variability
[22] Radio Frequency
[23] Phasor Measurement Units
[24] High-speed Sampling
[25] Digital Filtering
[26] Communication Interfaces
[27] Array Programmable Gate Array
[28] Application-Specific Integrated Circuit
[29] Energy Management Systems
[30] Energy Storage Systems
[31] Microcontrollers
[32] Embedded Processors
[33] Communication Chips
[34] Interface Circuits
[35] Edge Computing
[36] Demand Response
[37] Supervisory Control and Data Acquisition
[38] Very Low Latency
[39] Reliability
[40] Fail-Safe

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026