

یک بررسی جامع و انتقادی بر روی شبکه های یکپارچه برق و گاز

علیرضا قدیری جعفری بیلگو

دانشجوی دکتری دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

نوید تقی زادگان کلانتری

استاد تمام دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

سجاد نجفی روادانق

استاد تمام دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

چکیده:

انرژی های تجدیدپذیر به طور گسترده ای برای کاهش آلودگی محیط زیست در مواجهه با بحران انرژی و تغییرات اقلیمی استفاده می شوند. عدم قطعیت در تولید برق توسط منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر مانند باد و سیستم های فتوولتائیک خورشیدی، چالش های قابل توجهی را برای بهره برداری از شبکه های توزیع ایجاد کرده است. بنابراین، پذیرش بیشتر انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت با موانعی روبرو شده است. به عنوان یک راه حل احتمالی برای الزام های جهانی شناخته شده کاهش انتشار CO₂ و استفاده بیشتر از انرژی های تجدیدپذیر، مفهوم سیستم های یکپارچه برق و گاز (IEPG) تکامل یافته است. چندین مدل، روش های بهینه سازی و بهره برداری بهینه در ادبیات با استفاده از تکنیک های تبدیل برق به گاز (P2G)، سیستم های جذب کربن (CCS)، توربین گاز، تولید همزمان برق و حرارت (CHP) و ماژول های میکرو توربین گاز معرفی شده اند. همچنین، برای عملکرد ایمن، پایدار و قابل اعتماد سیستم های IEPG، دستگاه های ذخیره سازی به طور کافی در هر دو شبکه برق و گاز یکپارچه شده اند. این مقاله یک بررسی جامع از سیستم های IEPG ارائه می دهد و موضوعاتی مانند عدم قطعیت ها، بهینه سازی ها، تأثیرات زیست محیطی، سیاست ها و مقررات، برنامه ریزی و مدل سازی را مورد توجه قرار می دهد. چالش ها و فرصت های شبکه های IEPG به طور گسترده مورد بحث قرار گرفته اند. مزایا و معایب مختلف توپولوژی های سیستم های IEPG به طور کامل مستند شده است، که این مقاله را به منبعی ارزشمند برای حرفه ای های صنعت و دانشگاهیان تبدیل می کند. شکاف های تحقیقاتی کلیدی شناسایی شده اند که می توانند با فناوری های پیشرفته پر شوند. خوانندگان از این مرور با آگاهی از وضعیت کنونی سیستم های IEPG و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه بهره مند خواهند شد.

واژگان کلیدی: برق، شبکه گاز، سیستم جذب کربن، انرژی های تجدیدپذیر، عدم قطعیت.

۱. مقدمه:

یکی از الزامهای شناخته شده جهانی در صنعت برق، کاهش انتشار CO_2 است. فناوری جذب و ذخیره کربن (CCS) به طور گسترده ای مورد مطالعه و اجرا در بسیاری از نیروگاه های زغال سنگ و گاز قرار گرفته است تا این چالش را برطرف کنیم. همچنین، کاهش کربن در بخش انرژی ممکن است از طریق ادغام گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک خورشیدی (PV)، باد، و انرژی خورشیدی متمرکز (CSP) امکان پذیر باشد. از سوی دیگر، تولید انرژی تجدیدپذیر به طور طبیعی تصادفی است و ذخیره سازی آن دشوار است، که این امر ظرفیت پذیرش انرژی تجدیدپذیر را در شبکه های برق کاهش می دهد. علاوه بر این، موانع فنی، اقتصادی و قانونی متعددی وجود دارد که باید پیش از انتقال و ذخیره سازی CO_2 با استفاده از فناوری CCS برطرف شوند.

به دلیل پیشرفت های اخیر در فناوری تبدیل برق به گاز (P2G)، اکنون امکان جذب و بازیافت CO_2 در مبدأ با استفاده از انرژی تجدیدپذیر مازاد وجود دارد. دلایل متعددی وجود دارد که چرا فناوری P2G به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای سیستم انرژی آینده محسوب می شود، سیستمی که انتظار می رود به شدت به تجدیدپذیرها وابسته بوده و سطح کمی از CO_2 را منتشر کند. تا زمانی که تجهیزات P2G مورد استفاده قرار می گیرد، CO_2 منتشر شده توسط یک نیروگاه گازسوز می تواند به طور مستقیم به گاز طبیعی (CH_4) تبدیل شود، که نیاز به حمل و نقل یا ذخیره سازی را از بین می برد. CH_4 تبدیل شده می تواند بخشی از تأمین سوخت خط لوله گاز طبیعی را جایگزین کند. بنابراین، مفهوم توسعه سیستم های یکپارچه برق و گاز (IEPG) تکامل یافته است.

توپولوژی های مختلف برای سیستم های IEPG در ادبیات برای بهره برداری بهینه و قابل اطمینان ارائه و بحث شده است. IEPG منطقه ای تمایل به شبکه های IEPG مشبک منطقه ای دارد، به ویژه با توجه به توپولوژی شبکه، به دلیل استفاده گسترده از واحدهای ذخیره سازی توزیع شده و کاربرد قطعاتی که امکان جریان دوطرفه برق را فراهم می کنند. بیشتر توپولوژی ها از ذخیره سازی حرارتی برای جدا کردن خصوصیات برق-حرارت واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP) و افزایش پذیرش توان باد استفاده می کنند. ذخیره سازی حرارتی، ذخیره سازی انرژی الکتریکی و یک گرم کننده الکتریکی در مرجع ترکیب شده اند تا انعطاف پذیری واحدهای CHP را به منظور ارتقای پذیرش توان باد بهبود بخشند، اما شبکه حرارتی به آرامی به CHP پاسخ می دهد. در ذخیره سازی و انتقال حرارتی، افت حرارتی رخ می دهد و انتشار CO_2 از واحدهای CHP به آلودگی محیط زیست کمک می کند. مراجع یک مدل کارآمد شامل CHP با تجهیزات کاهش کربن و پاسخ به تقاضا را پیشنهاد می کنند. این تجهیزات انتشار CO_2 را کاهش می دهند، اما هزینه های عملیاتی را افزایش می دهند. یک سیستم چرخه کربن یکپارچه شامل P2G، جذب کربن و چرخه CO_2 فوق بحرانی ($S-CO_2$) بررسی شده و نقش آن در سیستم انرژی یکپارچه برق-حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. یک مدل IEPG شامل توربین گاز، سیستم باد، چاه گاز و مخازن ذخیره سازی گاز توسعه یافته و یک مدل بهینه سازی برای به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی کلی طراحی شده است.

عدم قطعیت در تولید انرژی تجدیدپذیر یکی از نگرانی های اصلی در سیستم IEPG است. سوال اصلی این است که چگونه عدم قطعیت ها مدیریت می شوند در حالی که مقادیر زیادی انرژی تجدیدپذیر یکپارچه می شود. با این حال، تکنیک های بهینه سازی متعددی، الگوریتم های بهره برداری، هوش مصنوعی و دستگاه های ذخیره سازی برای مدیریت عدم قطعیت استفاده می شوند. در ادبیات موجود، بهینه سازی قوی (RO) برای پذیرش کامل نوسانات انرژی تجدیدپذیر در شبکه های IEPG استفاده شده است. در یک مطالعه، بهینه سازی هزینه و امکان سنجی سیستم IEPG با ادغام سطح بالایی از انرژی تجدیدپذیر با استفاده از مدل RO پیشنهاد شده است. یک برنامه ریزی تولید مقاوم دو مرحله ای بر اساس یک مدل جریان گاز گذرا تقریبی برای مدیریت عدم قطعیت در سیستم IEGS ارائه شده است. مدل RO به عنوان یک مدل محافظه کار شناخته شده است که احتمال متغیرهای تصادفی را در نظر نمی گیرد. احتمال انرژی تجدیدپذیر در IEPG می تواند از طریق داده های تاریخی تولید برق تخمین زده شود. ایراد اصلی بهینه سازی های مقاوم و بازه های برای کاربردهای IEGS این است که اگر پارامترهای عدم قطعیت یا نوسانات به اندازه کافی معقول نباشند، بسیار محافظه کار هستند. بنابراین، هدف اولیه از ادغام انرژی تجدیدپذیر با سیستم IEPG به دست نمی آید زیرا نرخ استفاده از انرژی تجدیدپذیر ممکن است کاهش یابد. همچنین، این روش های بهینه سازی نیاز به اجرا به صورت متمرکز دارند که معایب متعددی برای کاربرد در سیستم IEPG دارد: (۱) امنیت داده ها به دلیل نیاز به اشتراک گذاری همه داده ها بین شبکه برق و گاز به خطر می افتد، و (۲) اشتراک گذاری داده های اضافی باعث افزایش بار محاسباتی در هر شبکه می شود. بهینه سازی مقاوم توزیعی یک راه حل بالقوه برای مدیریت عدم قطعیت ها در سیستم های یکپارچه انرژی تجدیدپذیر است. با این حال، هنوز برای یک سیستم پیچیده IEPG برای بهبود امنیت گاز و قابلیت اطمینان کلی بررسی نشده است. با اینکه مقالات پژوهشی زیادی در زمینه سیستم های IEPG وجود دارد، یک خلا در خلاصه سازی آن ها از دیدگاه کلی وجود دارد. به دلیل اهمیت این موضوع، این مقاله هدف دارد تا خلاصه ای دقیق از توپولوژی ها و عدم قطعیت ها در مدیریت سیستم های IEPG ارائه دهد. این مقاله همچنین تلاش می کند تا رابطه میان این موضوعات را بررسی کند تا تحقیقات جاری در سیستم های IEPG پیش برود. علاوه بر این، توسعه های اولیه در توپولوژی ها و مدیریت عدم قطعیت های IEPG و همچنین جدیدترین آن ها مورد بحث قرار گرفته و جهت های تحقیقاتی آینده برای کمک به خوانندگان ارائه شده است. ویژگی متمایز دیگر این پژوهش این است که فهرستی جامع از چالش ها و توصیه های آینده برای هدایت پژوهشگران و صنعتگران ارائه شده است. باقی مانده این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: فرایند توسعه مرور در بخش ۲ مستند شده است. ساختار کلی سیستم های IEPG در بخش ۳ ارائه شده است. استراتژی های عملیاتی شبکه های IEPG در بخش ۴ خلاصه شده است. برنامه ریزی IEPG با مسائل مدیریت عدم قطعیت برای کمک به پذیرش بیشتر انرژی تجدیدپذیر در بخش ۵ مورد بحث قرار گرفته است. سیاست ها و مقررات سیستم IEPG در بخش ۶ بحث شده است. تاثیرات مثبت و منفی زیست محیطی IEPG در بخش ۷ ارائه شده است. چالش ها و فرصت ها در بخش ۸ فهرست شده اند. در نهایت، بخش ۹ نتیجه گیری این کار را ترسیم می کند.

۲. فرآیند توسعه مرور

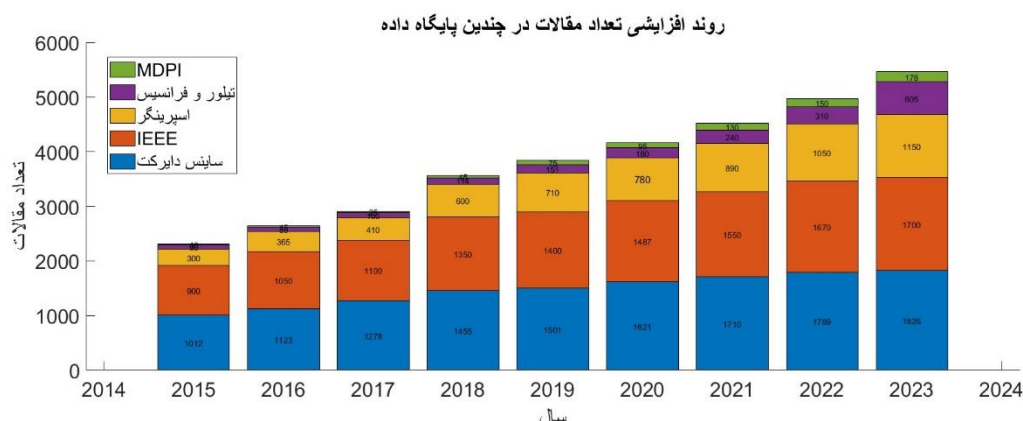
فلوچارت توسعه این مرور در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. این فرآیند با انتخاب پایگاه‌های داده از منابع معتبر مانند ScienceDirect, IEEE, Springer, Taylor & Francis, و MDPI آغاز می‌شود. جستجو به گونه‌ای طراحی شده است که کلمات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق را شامل شود. این کلمات کلیدی شامل اما نه محدود به «برق و گاز»، «شبکه گاز»، «تبدیل برق به گاز»، «تبدیل گاز به برق»، «برق به X»، «شبکه‌های یکپارچه برق و گاز»، «برنامه‌ریزی شبکه گاز»، «برنامه‌ریزی شبکه برق»، «مرورها»، «سیستم‌های جذب کربن»، «انرژی‌های تجدیدپذیر»، «عدم قطعیت»، «انرژی باد و شبکه‌های گاز»، «انرژی خورشیدی و شبکه‌های گاز»، «سیاست‌ها و مقررات P2G» و دیگر موارد مرتبط با محدوده مطالعه هستند. مراحل بعدی در فرآیند مرور شامل فیلتر کردن دقیق برای اطمینان از گنجاندن مقالاتی است که به دقت با اهداف تحقیق هم‌راستا باشند. در ابتدا، مقالاتی که تطابق کمی با کلمات کلیدی دارند حذف می‌شوند و پس از آن، مقالاتی که تنها به طور سطحی با موضوعات اصلی مانند تبدیل برق به گاز، برنامه‌ریزی شبکه برق و گاز، ملاحظات سیاستی، عدم قطعیت‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط هستند، حذف می‌شوند. این پالایش تکراری، انتخاب مقالاتی را تضمین می‌کند که به طور مستقیم به بررسی شبکه‌های یکپارچه برق و گاز کمک می‌کنند.

پس از جمع‌آوری اولیه مقالات، بررسی دقیقی از عناوین، چکیده‌ها و نتایج آن‌ها انجام می‌شود تا ارتباط و هم‌راستایی آن‌ها با اهداف مطالعه ارزیابی شود. مقالاتی که به طور ناکافی جنبه‌های کلیدی مانند فناوری‌های تبدیل برق به گاز، استراتژی‌های برنامه‌ریزی شبکه، پیامدهای سیاستی، عدم قطعیت‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی را پوشش می‌دهند، از مرور حذف می‌شوند. مقالات انتخاب شده تحت تجزیه و تحلیل عمیق محتوا قرار می‌گیرند تا بینش‌هایی استخراج شده، مزایا برجسته شده، زمینه‌های قابل بهبود مشخص شده و چشم‌اندازهای نوآورانه در شبکه‌های برق و گاز بررسی شوند.

این رویکرد سیستماتیک تضمین می‌کند که مقاله مرور یک دیدگاه جامع از شبکه‌های یکپارچه برق و گاز ارائه می‌دهد و بینش‌های ارزشمندی برای پژوهشگران، سیاست‌گذاران و ذینفعان صنعتی که به ادغام پایدار سیستم‌های انرژی علاقه‌مند هستند، فراهم می‌کند.

شکل ۲ نمای کلی از تعداد تقریبی مقالات منتشر شده در زمینه شبکه‌های یکپارچه برق و گاز در پایگاه‌های داده علمی مختلف از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. این پایگاه‌های داده شامل ScienceDirect, IEEE, Springer, Taylor & Francis و MDPI هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک روند صعودی قابل توجه در تعداد مقالات منتشر شده در تمام پایگاه‌های داده دیده می‌شود. به عنوان مثال، تعداد مقالات منتشر شده در ScienceDirect به طور پیوسته از ۱۰۱۲ مقاله در سال ۲۰۱۵ به ۱۸۲۶ مقاله در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. به همین ترتیب، IEEE نیز الگوی رشد ثابتی را نشان می‌دهد، به طوری که تعداد مقالات منتشر شده از ۹۰۰ مقاله در سال ۲۰۱۵ به ۱۷۰۰ مقاله در سال ۲۰۲۳ رسیده است. Springer, Taylor & Francis و MDPI نیز طی سال‌ها افزایش قابل توجهی داشته‌اند، اگرچه با نوساناتی همراه بوده‌اند. مقالات Springer به ویژه از ۵۴ مقاله در سال ۲۰۱۵ به ۶۰۵ مقاله در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. همچنین Taylor & Francis و MDPI نیز رشد قابل توجهی را نشان می‌دهند، به طوری که Taylor & Francis در سال ۲۰۲۲ بیش از ۲۰۰ مقاله و MDPI در سال ۲۰۲۳ به ۱۷۸ مقاله رسیده‌اند. با تحلیل درصد افزایش، ScienceDirect رشد چشمگیری به میزان تقریبی ۸۰ درصد از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ را تجربه کرده است. IEEE نیز افزایش قابل توجهی به میزان حدود ۸۹ درصد در همان دوره

زمانی داشته است. در همین حال، مقالات Springer بیش از ۱۰۰ درصد افزایش را از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ شاهد بوده اند که نشان دهنده گسترش قابل توجه در خروجی پژوهشی است. به طور کلی، این شکل یک روند صعودی مستمر در مقالات علمی منتشر شده در پایگاه های داده مختلف را منعکس می کند که بر پیشرفت و گسترش مداوم پژوهش های علمی در زمینه سیستم های یکپارچه برق و گاز تأکید دارد.



شکل ۱: روند صعودی تعداد انتشارات در چندین پایگاه داده

۳. توصیف کلی شبکه های یکپارچه برق و گاز:

یک شبکه یکپارچه برق و گاز یک زیرساخت پیچیده و به هم پیوسته است که به طور کارآمد چندین مؤلفه را برای تولید، توزیع و استفاده از انرژی و گاز طبیعی ترکیب می کند، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیستم پیچیده شامل یک شبکه توزیع گاز کامل است که مسئول انتقال گاز طبیعی از مبدأ آن، که شامل چاه های گاز و مخازن ذخیره سازی است، به مصرف کنندگان نهایی می باشد. شبکه توزیع برق نقش مهمی در انتقال برق از تأسیسات تولید برق به بسیاری از سایت های مصرفی به طور هم زمان دارد. این شبکه از نیازهای مختلف گاز، از جمله نیازهای صنعتی، مسکونی و تجاری پشتیبانی می کند که برای مقاصد مختلفی مانند گرمایش و پخت و پز به این تأمین وابسته هستند. همچنین، مصرف کنندگان مختلف برق، از جمله خانوارها و مجتمع های صنعتی بزرگ، به سیستم برق متصل برای تأمین برق مورد نیاز برای راه اندازی طیف گسترده ای از تجهیزات و ماشین ها وابسته اند.

یکی از ویژگی های مهم این شبکه یکپارچه، گنجاندن ژنراتورهای توزیع شده است که پایداری و تاب آوری محیط انرژی را افزایش می دهند. این ژنراتورها از منابع انرژی پایدار مانند پنل های فتوولتائیک خورشیدی و توربین های بادی برای معرفی برق دوستدار محیط زیست و غیرآلاینده به شبکه الکتریکی استفاده می کنند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع شده به منظور گسترش دامنه منابع انرژی و همچنین کمک فعال به کاهش کلی انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی متعارف است. علاوه بر این، ادغام انرژی های تجدیدپذیر به تعادل بین عرضه و تقاضای برق و گاز طبیعی کمک می کند. گنجاندن

مخازن ذخیره سازی گاز برای اطمینان از تأمین پایدار گاز طبیعی ضروری است و به عنوان ذخیره ای برای تأمین نیازهای دوره های با تقاضای بالا عمل می کند. در دوره های تولید بیش از حد برق، انرژی اضافی می تواند برای تأمین سوخت فرآیندهای الکترولیز به منظور تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گیرد. این هیدروژن سپس می تواند به صورت گازی ذخیره شده یا به شبکه گاز وارد شود. این سیستم نشان دهنده یک رویکرد پیشرفته به زیرساخت های انرژی است که بر پایداری و تاب آوری در پاسخ به تغییرات نیازهای انرژی و نگرانی های زیست محیطی تأکید دارد. با پیشرفت جهانی به سمت راه حل های انرژی سبزتر، ایجاد شبکه های یکپارچه ای مانند این، آینده ای کارآمدتر، پایدارتر و مرتبط تر برای انرژی را تسهیل می کند.

۴. عملیات سیستم های IEPG

سیستم های IEPG (شبکه های یکپارچه برق و گاز) نمایانگر پیشرفت مهمی در زیرساخت های انرژی هستند که با ترکیب شبکه های برق با شبکه های گاز، راه حل جامعی برای مقابله با مسائل پیچیده ای که در سیستم های انرژی معاصر وجود دارد، ارائه می دهند. این سیستم ها با ترکیب منابع مختلف انرژی مانند انرژی های تجدیدپذیر و گاز طبیعی به همراه راه حل های پیشرفته ذخیره سازی انرژی، بهره برداری بهینه از منابع و بهبود بهره وری انرژی را ممکن می سازند. این استراتژی جامع فراتر از روش های سنتی برنامه ریزی و مدیریت انرژی است و به بهبود همکاری بین شبکه های برق و گاز برای بهینه سازی تاب آوری، قابلیت اطمینان و پایداری سیستم کمک می کند.

پتانسیل تحول آفرین سیستم های IEPG در توانایی آنها برای بهره برداری از ویژگی های مکمل زیرساخت های برق و گاز نهفته است. ایستگاه های کمپرسور در داخل شبکه های گاز طبیعی فشار بهینه را تنظیم و حفظ می کنند و انتقال بدون مشکل بین منابع سوخت مختلف را ممکن می سازند. در مطالعه ای که در سیستم انتقال گاز در جنوب ولز، بریتانیا انجام شد، مدل محاسباتی ایجاد شد تا توانایی ایستگاه های کمپرسور در ارائه انعطاف پذیری به سیستم برق را بررسی کند (Y. Zhao et al., 2021).

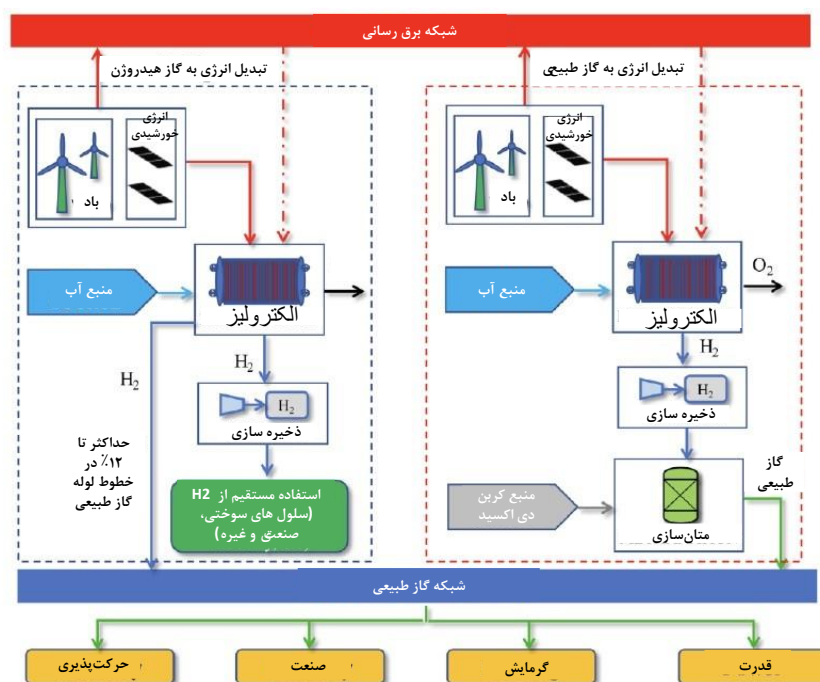
این مطالعه نشان داد که کمپرسورها قابلیت افزایش انعطاف پذیری سیستم برق را از طریق تنظیم مصرف انرژی و انتقال بین واحدهای گازسوز و برقی دارند. ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و وابستگی رو به رشد به سیستم های تأمین گاز، چالش هایی در حفظ تعادل در سیستم برق ایجاد می کند. در مرجع (Ameli et al., 2017)، ایستگاه های کمپرسور چندجهته انعطاف پذیر و روشی جامع برای مدیریت شبکه های گاز و برق توسعه داده شده است. همچنین، یک مدل برنامه ریزی خطی دو سطحه با متغیرهای عدد صحیح برای بهینه سازی اندازه، موقعیت و عملیات سیستم های ذخیره سازی انرژی چندگانه در سیستم های P2G (تبدیل برق به گاز) ارائه شده است (Rowe et al., 2024). شبکه های برق در انتقال و توزیع برق بسیار کارآمد هستند، در حالی که شبکه های گاز در ذخیره و انتقال انرژی به صورت گاز طبیعی بسیار موثر عمل می کنند. شبکه های IEPG با ادغام فناوری های مختلف، به هماهنگی و بهینه سازی جریان های انرژی کمک می کنند و از این طریق انعطاف پذیری در تولید، توزیع و مصرف انرژی را افزایش می دهند. این هم افزایی نه تنها اثربخشی سیستم را بهبود می بخشد، بلکه با ترویج استفاده از منابع انرژی پاک تر و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، اثرات منفی بر محیط زیست را نیز کاهش می دهد (Zhang et al., 2024). در مرجع (Son et al., 2024)، یک مدل جدید اقتصادی برای بهره برداری که شامل فناوری تبدیل برق به گاز می شود و دیدگاه های ذینفعان را در نظر می گیرد، ارائه شده است. این روش در چارچوب بازار مبتنی بر هزینه در کره جنوبی ارزیابی شده و هدف آن ارتقای مشارکت ذینفعان و بهبود کارایی اقتصادی است. مدل بهبود یافته اقتصادی تضمین می کند که مزایای مطلوب برای هر گروه از ذینفعان فراهم شود که منجر به عملیات کارآمد سیستم های P2G می شود. در مرجع (Zhai et al., 2023)،

یک مشکل بهره برداری مقاوم و تنظیم پذیر غیر متمرکز برای سیستم های IEPG در چندین منطقه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی یک مدل غیر متمرکز ناهمزمان مبتنی بر روش جهت گیری جایگزین چندگانه (ADMM) است. این مدل برای ادغام با سیستم های کنترل تولید خودکار طراحی شده است تا تاثیر ناپایداری انرژی های تجدید پذیر را کاهش دهد. همچنین، مرجع (Marin et al., 2023) نیاز رو به رشد برای تولید گرما و برق، به ویژه با تمرکز بر واحدهای توربین گاز، را بررسی می کند. روش پیشنهادی استفاده از سوخت های جایگزین مانند هیدروژن را با هدف کاهش انتشار و بهبود کارایی بررسی می کند. روش "تبدیل برق به گاز" نیز مورد تاکید قرار گرفته و مزایای استفاده از ترکیب هیدروژن و گاز طبیعی در توربین های گاز را برجسته می کند. این مطالعه یک مدل ریاضی ارائه می دهد که تغییرات در خصوصیات انرژی و زیست محیطی را ناشی از استفاده از ترکیبات سوختی مختلف نشان می دهد. علاوه بر این، سیستم های IEPG نقش حیاتی در بهبود امنیت انرژی و تاب آوری در زمانی که با تهدیدات فزاینده تغییرات اقلیمی و عدم قطعیت های ژئوپلیتیکی مواجه هستیم، ایفا می کنند

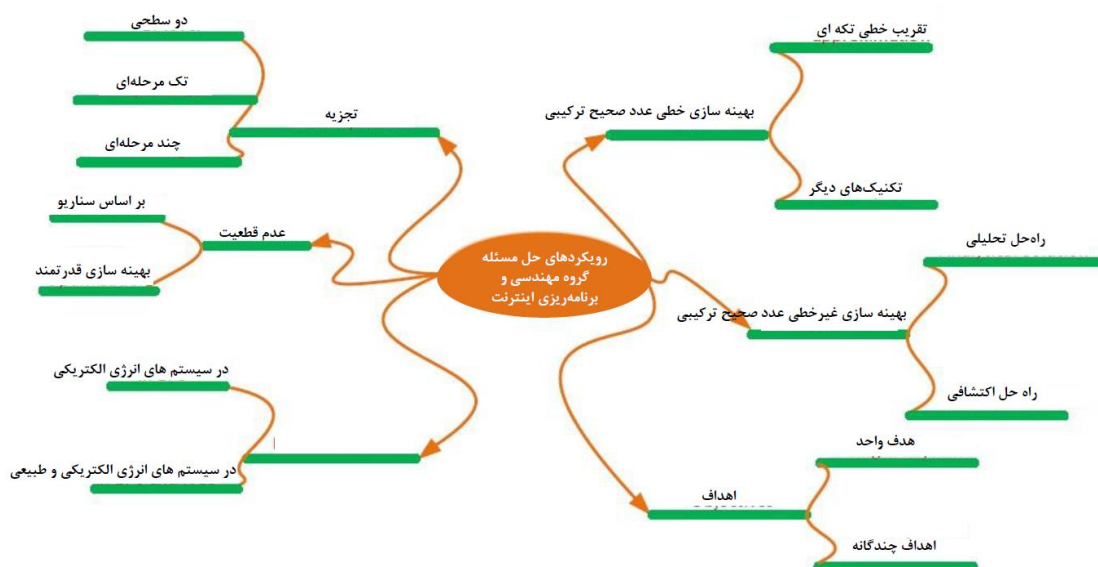
(Saâdaoui & Ben Jabeur, 2023)، (Feofilovs et al., 2019). این سیستم ها با تنوع بخشی به منابع و زیرساخت های انرژی، وابستگی به زنجیره های تامین تک منبعی را کاهش داده و احتمال اختلالات در تامین را به حداقل می رسانند. همچنین، ادغام شبکه های برق و گاز امکان پیاده سازی منابع انرژی توزیع شده (DERs) و ریزشبکه ها را فراهم می کند که به جوامع این امکان را می دهد تا انرژی خود را در مقیاس محلی تولید، ذخیره و کنترل کنند

(Mehrerjedi et al., 2022; Puchalapalli et al., 2020; Xu et al., 2017). این استراتژی غیر متمرکز نه تنها خود کفایی انرژی را بهبود می بخشد، بلکه با کاهش آسیب پذیری در برابر اختلالات خارجی، پایداری سیستم را تقویت می کند. ایده "تبدیل برق به گاز" دو گزینه عملیاتی را ارائه می دهد، بسته به گاز تولید شده: هیدروژن (پیکربندی PtH₂) یا گاز طبیعی مصنوعی (پیکربندی PtSNG)، همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است. گزینه PtH₂ امکان استفاده مستقیم از هیدروژن الکترولیتی تجدید پذیر به عنوان سوخت یا تزریق آن به زیرساخت خط لوله گاز طبیعی را فراهم می کند. با این حال، خطوط لوله در شبکه گاز طبیعی به طور اولیه برای تحمل ویژگی های خاص هیدروژن، مانند نفوذ پذیری و انتشار هوای بالاتر، کاهش دوام خطوط لوله (به دلیل شکنندگی)، چگالی کمتر، ارزش حرارتی کمتر و شاخص ووبه پایین تر نسبت به گاز طبیعی طراحی نشده اند. بنابراین، برای اطمینان از ایمنی، لازم است غلظت هیدروژن در شبکه های گاز در محدوده های خاصی کنترل شود

(Götz et al., 2016). این محدودیت ها گزینه PtSNG را به یک جایگزین جذاب و عملی برای شرایط کوتاه مدت و میان مدت تبدیل می کند. در گزینه PtSNG، هیدروژن الکترولیتی تجدید پذیر به عنوان یک واکنش دهنده به همراه دی اکسید کربن در فرآیند متان سازی که مبتنی بر فرآیند ساباتیر است، استفاده می شود (Chein et al., 2016).



شکل ۲: توپولوژی شبکه یکپارچه برق و گاز



شکل ۳: رویکردهای راه حل برای برنامه ریزی یکپارچه شبکه گاز برق

سیستم‌های IEPG نه تنها امنیت انرژی و تاب‌آوری را افزایش می‌دهند، بلکه با ایجاد فرصت‌های جدید برای پیشرفت فناوری، ایجاد اشتغال و سرمایه‌گذاری، نوآوری و رشد اقتصادی را نیز تحریک می‌کنند. ادغام منابع انرژی پایدار، مانند انرژی خورشیدی و بادی، با فناوری‌های تولید انرژی مبتنی بر گاز و ذخیره‌سازی انرژی، فرصت‌هایی برای رشد اقتصادی پایدار ایجاد می‌کند و در عین حال وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اجرای سیستم‌های پیشرفته نظارت، کنترل و اتوماسیون در شبکه‌های IEPG امکان بهینه‌سازی فوری جریان‌های انرژی را فراهم می‌کند. این امر نه تنها بهره‌وری سیستم را بهبود می‌بخشد، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد. سیستم‌های IEPG یک تغییر بنیادی در زیرساخت‌های انرژی را نشان می‌دهند و مسیری به سوی آینده‌ای سازگارتر با محیط زیست، پایدارتر و منصفانه‌تر در حوزه انرژی فراهم می‌کنند.

۵. برنامه‌ریزی سیستم IEPG

برنامه‌ریزی یک شبکه یکپارچه برق و گاز شامل رویکردی جامع است که هدف آن هماهنگ‌سازی زیرساخت‌ها و عملیات هر دو سیستم انرژی برای به حداکثر رساندن بهره‌وری و قابلیت اطمینان است. این فرآیند نیازمند هماهنگی دقیق منابع تولید، انتقال و توزیع در هر دو شبکه است تا تقاضا را با حداقل هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی برآورده کند. عملیات بهینه از طریق تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی و شبیه‌سازی که عواملی مانند پیش‌بینی تقاضا، محدودیت‌های شبکه، در دسترس بودن سوخت و پویایی بازار را در نظر می‌گیرند، محقق می‌شود. با ادغام شبکه‌های برق و گاز، هم‌افزایی‌هایی به دست می‌آید که تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌بخشد و در نهایت منجر به تأمین انرژی پایدارتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای مصرف‌کنندگان و صنایع می‌شود (Khatibi et al., 2023). رویکردهای حل مسئله در برنامه‌ریزی IEPG شامل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی عدد صحیح مختلط، روش مبتنی بر اهداف، بهینه‌سازی مقاوم، رویکردهای تک‌مرحله‌ای/چندمرحله‌ای و موارد دیگر است که در شکل ۵ نشان داده شده است. بهترین اندازه‌یابی تأسیسات تبدیل برق به گاز و عملیات بهینه سیستم‌های انرژی یکپارچه با استفاده از الگوریتم‌ها و بویلرهای الکتریکی در مرجع (Zhan et al., 2022) ارائه شده است. یک مدل مقاوم در برابر توزیع عدم قطعیت در توان بادی ساخته شده است. این مدل امکان اقدامات لحظه‌ای را هنگامی که عدم قطعیت‌ها آشکار می‌شوند، فراهم می‌کند. یک مطالعه موردی اثربخشی اجرای این رویکردها را تأیید می‌کند، که منجر به کاهش هزینه‌های کلی سیستم، افزایش انعطاف‌پذیری واحد CHP، و کاهش جریان برق معکوس می‌شود.

۵-۱ برنامه‌ریزی سیستم برق

برنامه‌ریزی یک سیستم انرژی به معنای پیش‌بینی تقاضای انرژی آینده یک کشور یا منطقه طی چندین دهه با هدف تضمین تأمین انرژی قابل اطمینان و هم‌زمان برآورده کردن نیازهای خاص است. این فرآیند به‌طور سنتی بر کاهش هزینه‌ها و اطمینان از قابلیت اطمینان تمرکز داشته است. اما به دلیل مقررات‌زدایی بازار، تضاد منافع ذینفعان و عدم قطعیت‌های ناشی از عواملی مانند منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای رو به افزایش انرژی، پیچیده‌تر شده است (Farrokhifar et al., 2020).

تصمیماتی که در مورد برنامه‌ریزی گرفته می‌شود، تحت تأثیر عواملی مانند ترجیحات مصرف انرژی، مناطق جغرافیایی و الگوهای توزیع قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش تعداد تعاملاتی که بین شبکه‌های مختلف انرژی رخ می‌دهد، ضروری است که انعطاف‌پذیری، قابلیت اطمینان و امنیت را به‌ویژه در صنعت برق در اولویت قرار داد (Tao et al., 2020). برنامه‌ریزان به دنبال کاهش هزینه‌ها هستند و در عین حال توازن عرضه و تقاضای انرژی را از دیدگاه اقتصادی بررسی می‌کنند. تصمیمات مربوط به

برنامه ریزی به طور قابل توجهی تحت تأثیر سیاست هایی مانند مالیات های کربن و محدودیت های انتشار قرار می گیرد، و تحلیل سناریو به سیاست گذاران در تصمیم گیری های آگاهانه کمک می کند. یک مسئله بهینه سازی غیرخطی عدد صحیح مختلط با انواع محدودیت ها، از جمله اهداف زیست محیطی، به طور مکرر برای حل مشکل برنامه ریزی سیستم انرژی استفاده می شود. اهداف برنامه ریزی شامل، اما نه محدود به، کاهش انتشار کربن (Qadrdan et al., 2015)، کاهش هزینه ها

(Koltsaklis & Georgiadis, 2015)، دستیابی به هدف دوگانه کربن (Qin et al., 2022) و قابلیت اطمینان سیستم انرژی (Z. Wang et al., 2022) است. یک مدل برنامه ریزی بلندمدت برای لوله های توزیع گاز طبیعی، ژنراتورها و بانک های خازنی در مرجع (Odetayo et al., 2017) ارائه شده است. هدف این مدل کاهش هزینه های ثابت و عملیاتی طی دوره ای ۱۰ ساله است. برای تضمین قابلیت اطمینان سیستم و در عین حال پذیرش ناپایداری تقاضای برق، این مدل از یک مسئله بهینه سازی غیرخطی عدد صحیح مختلط با محدودیت احتمالی استفاده می کند. خروجی های مدل شامل مکان و اندازه بهینه ژنراتورها و بانک های خازنی با حداقل درجه قابل قبول قابلیت اطمینان که ۹۶٪ است.

در برنامه ریزی سیستم انرژی، برنامه ریزان باید عدم قطعیت هایی را که از چند ماه تا چند دهه را شامل می شود، به دلیل پیشرفت های مداوم فناوری، تغییرات بازار، تغییرات سیاست و رویدادهای طبیعی، در نظر بگیرند. این عدم قطعیت ها که به دو دسته پارامتریک و ساختاری تقسیم می شوند، نیاز به رویکردهای تحلیلی متفاوتی دارند (Hosseini et al., 2021). عدم قطعیت های پارامتریک شامل متغیرهای ورودی مدل می شود، در حالی که عدم قطعیت های ساختاری مربوط به خطاهای ساختاری مدل است (Jackson et al., 2010). مدل های برنامه ریزی سیستم انرژی که عواملی مانند انرژی، اقتصاد و محیط زیست را مورد توجه قرار می دهند، به دلیل این عدم قطعیت ها با چالش هایی در نمایاندن دقیق واقعیت مواجه هستند. یکی از روش های رایج برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در برنامه ریزی سیستم انرژی استفاده از برنامه ریزی تصادفی است

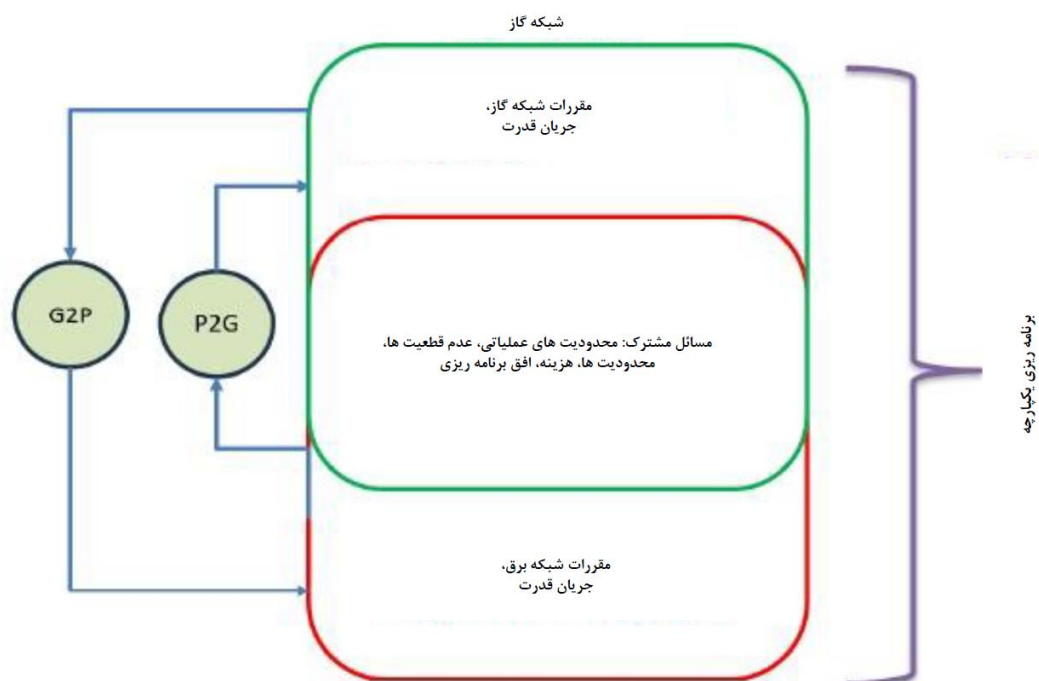
(Birge & Louveaux, 2011). شرایط برنامه ریزی و عملیاتی یک سیستم می تواند توسط مسائل دو مرحله ای یا چند مرحله ای نمایان شود. هر گره در یک درخت سناریو نمایانگر نتیجه ای متفاوت در طول زمان است؛ این به تجسم فرآیند برنامه ریزی کمک می کند. با این حال، برای خاص تر بودن، باید تعداد زیادی از احتمالات در نظر گرفته شود. با افزایش تعداد عوامل برنامه ریزی، تعداد سناریوها نیز به صورت نمایی افزایش می یابد. علاوه بر این، برآورده کردن این تقاضا که مدل سازان باید توزیع احتمالی دقیق سناریوها را با استفاده از داده های گذشته بدانند، چالش برانگیز است. دانش کارشناسان در فرآیند ایجاد سناریوهای ممکن، مانند تعیین ترجیحات مختلف ذینفعان و اطمینان از منطقی بودن گزینه های ممکن، نقش حیاتی ایفا می کند

(J. H. Zhao et al., 2009) [۵۶]. یک مدل بهینه سازی مقاوم دو مرحله ای با استفاده از معیار Wasserstein برای حل مشکلات بهره برداری اقتصادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و هزینه های زیست محیطی در مرجع (Siqin et al., 2022) ارائه شده است. کارهای آینده می تواند بر روی بهینه سازی بیشتر ادغام دستگاه های تبدیل برق به گاز در سیستم های ریزشبکه ترکیبی خنک کننده، گرمایشی و برقی (CCHP) متمرکز شود، با بررسی استراتژی های پیشرفته کنترل برای بهبود پایداری و کارایی سیستم در حالی که تأثیرات زیست محیطی را به حداقل می رساند. با استفاده از یک مدل بهینه سازی مقاوم مبتنی بر مجموعه داده ها، مرجع (Li et al., 2021) به عدم قطعیت های توان بادی و طرح های مختلف پاسخگویی به تقاضا پرداخته و

در عین حال سیستم CHP-P2G را در ریزش شبکه های CCHP ادغام می کند. یک مدل بهینه سازی مقاوم که روش های Wasserstein و وابسته خطی چندمتغیره را ترکیب می کند تا دستگاه های تبدیل برق به گاز را در یک سیستم ترکیبی خنک کننده، گرمایشی و برقی ادغام کند، در مرجع (Y. Wang et al., 2022) معرفی شده است. این مدل هزینه های عملیاتی را به حداقل می رساند و منابع انعطاف پذیر را برای مدیریت مؤثر عدم قطعیت ها تطبیق می دهد.

۵-۲ برنامه ریزی سیستم گاز

در شبکه های تبدیل برق به گاز، برنامه ریزی مؤثر سیستم گاز برای اطمینان از استفاده بهینه از انرژی های تجدیدپذیر و عملکرد بهینه زیرساخت های انرژی یکپارچه بسیار مهم است. این برنامه ریزی شامل تعیین ظرفیت و طرح بندی خطوط لوله گاز، تأسیسات



ذخیره سازی و شبکه های توزیع برای پذیرش تزریق هیدروژن تجدیدپذیر یا گاز طبیعی مصنوعی تولید شده از طریق فرآیندهای الکترولیز یا متان سازی است. عواملی مانند نوسانات تقاضای گاز، ادغام شبکه های انرژی تجدیدپذیر، توزیع جغرافیایی مراکز تولید و مصرف انرژی، و چارچوب های مقرراتی باید در توسعه یک سیستم گاز مقاوم و تاب آور که بهره برداری از انرژی های تجدیدپذیر را به حداکثر می رساند و امنیت انرژی را افزایش می دهد، مد نظر قرار گیرد. مرجع (Wen et al., 2022) استراتژی ای را برای بهینه سازی برنامه ریزی زیرساخت ها و تخصیص جریان در سیستم های شبکه لوله کشی ارائه می دهد. این تحلیل محدودیت های عملیاتی مانند تأمین گاز، تقاضای مصرف کننده، ظرفیت انتقال، نرخ جریان در نقاط مختلف و ظرفیت ذخیره سازی گاز را در نظر می گیرد.

معادلات جریان گاز شامل شبکه های گاز طبیعی به روشی مشابه با معادلات جریان قدرت متناوب (AC) است. این معادلات ابزاری مهم برای استفاده در مدل های برنامه ریزی و ارزیابی عملکرد روزانه شبکه های گاز طبیعی هستند. این واقعیت که گاز به

دلیل اختلاف فشار بین دو انتهای لوله از میان لوله ها جریان پیدا می کند، معادلات جریان گاز طبیعی را ایجاد می کند. طبق معادله برنولی برای جریان سیال، نرخ جریان متناسب با اختلاف فشار است (Sidarto et al., 2017). مانند قوانین کیرشهف برای شبکه های برق، معادله برنولی برای شبکه های گاز طبیعی اعمال می شود. عواملی مانند چگالی، دما، فشار، سرعت و غیره برای تعیین جریان گاز طبیعی از طریق لوله ها استفاده می شوند. ساده سازی این معادلات در طول لوله هایی که عناصر شبکه های گاز طبیعی را متصل می کنند، اغلب به دینامیک سیالات یک بعدی منجر می شود. با کمک معادله مومنوم، معادله جرم و معادله حالت، دینامیک سیالات را می توان توصیف کرد (Fletcher, 2012).

در برنامه ریزی شبکه گاز، اهداف ممکن است شامل بهینه سازی سرمایه گذاری زیرساختی برای برآوردن تقاضای فعلی و آینده به طور مؤثر، حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم، به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی، اطمینان از ایمنی و تطابق با مقررات، افزایش بهره وری انرژی، تسهیل ادغام انرژی های تجدیدپذیر، کاهش تأثیرات زیست محیطی و حمایت از توسعه اقتصادی باشد. این اهداف تصمیم گیری های مربوط به طرح بندی شبکه، توسعه ظرفیت، نگهداری و مدیریت را هدایت می کنند و هدف آن تأمین گاز قابل اعتماد، مقرون به صرفه و پایدار است در حالی که الزامات قانونی و نیازهای اجتماعی را برآورده می کند

(Erdener et al., 2023; Fan et al., 2020; Klatzer et al., 2022). با همسو کردن تلاش های برنامه ریزی با اهداف سیاست انرژی گسترده تر و اهداف پایداری محیط زیست، ذینفعان می توانند استراتژی های مقاوم و انطباق پذیری برای مقابله با چالش های در حال تحول در صنعت گاز توسعه دهند و به آینده ای پایدارتر در حوزه انرژی کمک کنند.

محدودیت ها در برنامه ریزی شبکه گاز شامل عوامل مختلفی است که طراحی، بهره برداری و مدیریت زیرساخت را محدود یا تحت تأثیر قرار می دهند (Tao et al., 2022). این محدودیت ها معمولاً شامل ملاحظات فیزیکی، فنی، مقرراتی، زیست محیطی و اقتصادی می شوند (Clegg & Mancarella, 2015; Liu et al., 2019; Nie et al., 2019). محدودیت های فیزیکی شامل عواملی مانند ویژگی های جغرافیایی، در دسترس بودن زمین و طرح بندی زیرساخت های موجود است که ممکن است قرارگیری و توسعه خطوط لوله و تأسیسات را محدود کند. محدودیت های فنی مربوط به محدودیت های مهندسی مانند الزامات فشار و نرخ جریان، سازگاری مواد خطوط لوله و ظرفیت ایستگاه های کمپرسور است. محدودیت های مقرراتی شامل تطابق با استانداردهای ایمنی، مقررات زیست محیطی، قوانین منطقه بندی و نیازمندی های مجوز است که توسط مقامات دولتی اعمال می شود. محدودیت های زیست محیطی شامل ملاحظاتمانند حفاظت از زیستگاه، محدودیت های استفاده از زمین و کاهش تأثیرات زیست محیطی، از جمله مدیریت کیفیت هوا و آب است. محدودیت های اقتصادی شامل عواملی مانند محدودیت های بودجه ای، معیارهای مقرون به صرفگی، شرایط بازار و دسترسی به منابع مالی است که بر تصمیمات سرمایه گذاری و قابلیت اجرایی پروژه تأثیر می گذارد (Nazari-Heris et al., 2020). تعادل بین این محدودیت ها برای توسعه برنامه های شبکه گاز که از نظر فنی امکان پذیر، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه، از نظر زیست محیطی پایدار و مطابق با مقررات است، ضروری است

(Bianchini et al., 2019).

۵-۳ برنامه ریزی ترکیبی سیستم برق و گاز

برنامه ریزی شبکه ترکیبی برق و گاز هم به مسائل فردی و هم به مسائل مشترک شبکه های برق و گاز توجه می کند، همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. از دیدگاه عملی و استراتژیک، هماهنگی شبکه های برق و گاز بسیار مهم است

(Tovar-Ramírez et al., 2019). در مرجع (Su et al., 2024) از روش بهینه سازی تصادفی برای ساخت یک چارچوب برنامه ریزی انتقال برای سیستم های گاز طبیعی و برق استفاده شده است. این معماری توانایی مقاومت در برابر شکست های منطقه ای مرتبط را از طریق تقویت اتصال شبکه بین مناطق عرضه و تقاضا افزایش می دهد. این سیستم به راحتی قابل تطبیق با سیستم های بزرگتر است و می تواند در زمینه های زیرساختی مختلف استفاده شود. مدل های محاسباتی برای برنامه ریزی گاز و برق روابط غیرمحدب و غیرخطی را نشان می دهند (Zeng et al., 2017). با استفاده از روش جهت دهی متناوب چندگانه (ADMM)، یک پارادایم برنامه ریزی توزیع شده برای هاب های انرژی (EHs)، گاز طبیعی و برق در مرجع

(H. Yang et al., 2021) توسعه داده شده است. با تقسیم مشکل برنامه ریزی مشترک به چندین زیرمسئله، این چارچوب از مقدار انرژی و گاز طبیعی مورد نیاز توسط هر گره به عنوان اطلاعات تفکیک کننده استفاده می کند. رویکرد برنامه ریزی شامل تعهد واحدها برای بازتاب دقیق عملیات است. یک مدل برای برنامه ریزی توسعه یک شبکه ترکیبی گاز و برق در مرجع

(Chaudry et al., 2014) طراحی شده است که در آن گنجاندن نیروگاه های گازسوز به عنوان اتصالات در نظر گرفته شده است. این مفهوم هزینه های عملیاتی و توسعه شبکه را کاهش می دهد و در عین حال استراتژیک ترین مکان ها را برای نیروگاه های تولید برق انتخاب می کند. این مدل برای ارزیابی نیازهای توسعه زیرساخت ها برای یک سیستم انرژی کم کربن استفاده شد. این مدل امکان بررسی تعاملات بین شبکه های مختلف را فراهم می کند و عواملی مانند تأمین کلی گاز و مکان جغرافیایی را در نظر می گیرد. یک رویکرد نوین برای برنامه ریزی بلندمدت در سیستم های انرژی یکپارچه برق و گاز با استفاده از چارچوب مبتنی بر بازی چندعاملی در مرجع (N. Yang et al., 2022) پیشنهاد شده است. هدف این است که فرآیند برنامه ریزی بین ذینفعان مختلف بهبود یابد. این سیستم مدل های سودآوری برای هر ذینفع ایجاد می کند، از یک روش بهینه سازی استفاده می کند و یک عنصر بازیکن مجازی را برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در بر می گیرد. این مدل با استفاده از یک الگوریتم جستجوی تکراری حل می شود و بازرسی های امنیتی را انجام می دهد. یک استراتژی بهینه سازی مبتنی بر داده برای بهره برداری اقتصادی از سیستم های یکپارچه برق و گاز طبیعی با عدم قطعیت بادی ارائه شده است (B. Zhao et al., 2022). با استفاده از داده های بادی تاریخی محدود، شبکه های مولد تقابلی داده های مصنوعی توان بادی را می سازند. این کار تخمین توزیع احتمالی بدترین حالت بهینه سازی مقاوم توزیعی را افزایش می دهد. با این حال، در این مطالعه همبستگی فضایی-زمانی عدم قطعیت بادی در نظر گرفته نشده است. یک استراتژی جدید برای برنامه ریزی سیستم انرژی یکپارچه برای تقویت شبکه های برق و گاز طبیعی در برابر رویدادهای شدید در مرجع (Pan et al., 2024) پیشنهاد شده است. این استراتژی از یک مدل برنامه ریزی سه سطحی، سناریوهای بدترین حالت و سیستم های آزمون دنیای واقعی برای ارزیابی تأثیر شبکه استفاده می کند. این کار می تواند با در نظر گرفتن انرژی های تجدیدپذیر و سازگاری با پویایی های بازار بهبود یابد تا مدل ما برای آینده ای مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر آماده باشد.

۶. سیاست‌ها و مقررات

در حوزه شبکه‌های یکپارچه برق و گاز، سیاست‌ها و مقررات نقش حیاتی ایفا می‌کنند. این سیاست‌ها و مقررات تعیین می‌کنند که چگونه این سیستم‌ها مدیریت، بهره‌برداری و با یکدیگر تعامل می‌کنند. این مقررات به منظور دستیابی به اهداف مختلفی طراحی شده‌اند، از جمله تضمین قابلیت اطمینان و امنیت تا ترویج رقابت و پایداری زیست‌محیطی

(Maroufmashat & Fowler, 2017). سیاست‌گذاران با چالشی مواجه هستند که باید بین نوآوری و سرمایه‌گذاری از یک سو و حفاظت از مصرف‌کننده و مسائل زیست‌محیطی از سوی دیگر تعادل برقرار کنند. با پیشرفت سیستم‌های انرژی، مقررات باید با چالش‌های جدید سازگار شوند، مانند ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و گذار به اقتصادهای کم‌کربن. این بخش به بررسی جنبه‌های مختلف حکمرانی، اقدامات سیاستی و چارچوب‌های مقرراتی می‌پردازد و چگونگی تأثیر آن‌ها بر ادغام و بهره‌برداری از شبکه‌های برق و گاز در چارچوب کلی‌تر انرژی را بررسی می‌کند.

مرجع (Bai et al., 2023) به بررسی مدل‌های کسب‌وکار و چارچوب‌های سیاستی لازم برای اجرای فناوری‌های جذب کربن و تبدیل برق به گاز می‌پردازد که برای کاهش انتشار کربن ضروری هستند. با بررسی همکاری بین ذینفعان و سودهای مالی، این مطالعه سه مدل کسب‌وکار مناسب را شناسایی کرده و مدل‌های بهینه‌سازی برای هر یک از آن‌ها توسعه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدل یکپارچگی عمودی دارای بالاترین پتانسیل برای اجرا است و اهمیت اقدامات سیاستی سفارشی برای حمایت از نیازهای مختلف پروژه‌ها را برجسته می‌کند. کارهای آینده می‌تواند بر روی بررسی بیشتر مکانیسم‌های همکاری بین‌المللی برای مقابله با چالش‌های فنی و موانع مالی در تجاری‌سازی چنین پروژه‌هایی تمرکز کند.

نویسندگان مرجع (Ratha et al., 2020) "سیاست‌های آفین" را معرفی می‌کنند که هدف آن‌ها ارائه اقدامات بازگشتی برای تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان گاز و ذخایر خط لوله به منظور افزایش انعطاف‌پذیری بین سیستم‌های برق و گاز طبیعی است. این سیاست‌ها امکان تنظیمات فوری در زمان واقعی در پاسخ به عدم قطعیت در تولید توان بادی را فراهم می‌کنند. ادغام زیرساخت‌های تبدیل برق به گاز (P2G) در سیستم‌های انرژی صنعتی با در نظر گرفتن جنبه‌های تکنو-اقتصادی، سیاستی و زیست‌محیطی در مرجع (Preston et al., 2020) ارزیابی شده است. این مطالعه با استفاده از یک رویکرد مدل‌سازی، قابلیت اجرای سیستم‌های P2G در انباریو را بررسی می‌کند و به پتانسیل آن‌ها برای پاسخگویی به تقاضای انرژی به صورت کارآمد و کاهش انتشارها تأکید می‌کند. این مطالعه نقش چارچوب‌های سیاستی در تشویق سرمایه‌گذاری در P2G را برجسته می‌کند، به طوری که دوره بازگشت سرمایه در شرایط مساعد سیاستی می‌تواند به ۲.۸ سال کاهش یابد. هنگامی که حذف کربن مجاز باشد، تولید برق با استفاده از گاز طبیعی می‌تواند هزینه‌های کاهش کربن را در سیستم‌های برق کربن‌زدایی شده ایالات متحده کاهش دهد (Bistline & Young, 2022).

با این حال، تولید برق توسط باد و خورشید بیش از گاز طبیعی است که نشان می‌دهد ممکن است جایگزینی گاز طبیعی آسان‌تر از ظرفیت آن باشد. یک مطالعه درباره سیاست‌های اقلیمی ایالات متحده در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان داد که افزایش انحراف معیار در سیاست‌های اقلیمی باعث کاهش ۵ درصدی انتشار CO₂ در بخش برق و ۲ درصدی انتشار CO₂ در کل اقتصاد می‌شود (Bergquist & Warshaw, 2023). این مطالعه همچنین شواهد کمی مبنی بر اینکه مقررات سختگیرانه اقلیمی به اقتصاد ایالت‌ها آسیب می‌زند، یافت. مطالعه‌ای در (Glenk & Reichelstein, 2022) به بررسی اقتصادی سیستم‌های قابل

برگشت تبدیل برق به گاز (PtG) پرداخته است که در زمان فراوانی برق آن را به هیدروژن تبدیل می کند و در زمان کمبود برق، برق تولید می کند. مدل این مطالعه برای آلمان و تگزاس نشان می دهد که سلول های سوختی احیای واحد در قیمت های فعلی هیدروژن رقابتی هستند و ممکن است در قیمت های پایین تر نیز سودآور باقی بمانند. جدول ۲ بینش ها، مشارکت ها و کاستی ها را در ادبیات موجود در زمینه سیاست ها و مقررات سیستم های IEPPG خلاصه می کند.

۷. تاثیرات زیست محیطی سیستم های IEPPG

هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی چندمنظوره، در تلاش ها برای گذار به سوی آینده ای پایدارتر، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. ظرفیت آن برای ذخیره و انتشار انرژی بدون تولید گازهای گلخانه ای، آن را به یک جایگزین امیدوارکننده برای سوخت های فسیلی تبدیل می کند (شکل ۷). با کاربردهایی که از سوخت برای وسایل نقلیه و منابع انرژی ثابت گرفته تا فرآیندهای صنعتی را شامل می شود، هیدروژن مزایای بسیاری ارائه می دهد. با این حال، پذیرش گسترده آن با چالش های فنی مانند هزینه بالای تولید و نیاز به فناوری های پیشرفته برای ذخیره سازی و حمل و نقل مواجه است. روش های مختلف تولید هیدروژن، انواع مختلفی از هیدروژن با ویژگی ها و کاربردهای متمایز تولید می کنند. هیدروژن سبز که از طریق الکترولیز آب با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید می شود، به عنوان گزینه ای پاک و پایدار با عدم تولید CO₂ برجسته است. مرجع (Qiu et al., 2023) مدلی به نام "ذخیره انرژی به عنوان خدمات" (ESaaS) مبتنی بر هیدروژن سبز برای بهبود کارایی اقتصادی سیستم های تبدیل برق به گاز (P2G) پیشنهاد می کند. در این مدل، اپراتور ESaaS سیستم را مدیریت می کند و میکروشبکه ها را قادر می سازد از خدمات ذخیره انرژی استفاده کنند و در عین حال از طریق تجارت برق و هیدروژن درآمد کسب کنند. رویکرد ESaaS می تواند برق تجدیدپذیر اضافی را به طور کامل استفاده کند و در نتیجه بهره وری انرژی های تجدیدپذیر در میکروشبکه ها را افزایش دهد. این نه تنها مزایای اقتصادی قابل توجهی دارد بلکه پایداری زیست محیطی را نیز افزایش می دهد.

گذار مالزی از سوخت های فسیلی به انرژی تجدیدپذیر چالش ها و فرصتهایی را به همراه دارد، به ویژه در زمینه ادغام هیدروژن (H₂). برنامه انرژی هیدروژن دولت ایالت ساراواک با چالش های ادغام زیرساخت ها، منابع ناکافی فناوری برای تولید پایدار هیدروژن و کمبود تجربه فنی مواجه شده است. برای غلبه بر این موانع، مقاله (Ahmad et al., 2021) نقشه راه ملی تبدیل برق به گاز (P2G) را ارائه می دهد که شامل راهبردها و برنامه های پژوهشی برای پیشرفت فناوری هیدروژن است. گذار انرژی پرتغال به سمت کربن زدایی با چالش ها و فرصتهایی روبروست، به ویژه با ظهور هیدروژن (H₂) در مسیرهای کم کربن. نقشه راه هیدروژن پرتغال با استفاده از روش های تحلیل جامع برای اولویت بندی زنجیره ارزش "تبدیل برق به گاز" (P2G) توسعه یافته است (Partidário et al., 2020). این رویکرد بر تولید و استفاده پایدار هیدروژن، به ویژه در کاربردهای گرمایشی، تمرکز دارد و گزینه های فناوری، بهره وری انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای را در نظر می گیرد. یک فرآیند چندتصمیمه برای برنامه ریزی مؤثر لازم است.

به طور کلی، سیستم های IEPPG نقش حیاتی در مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش آلودگی هوا با ترویج استفاده از منابع انرژی پاک تر و تسهیل اجرای فناوری های بهره وری انرژی ایفا می کنند. این به نوبه خود منجر به بهبود کیفیت محیط زیست و سلامت عمومی می شود.

تولید هیدروژن خاکستری، عمدتاً از طریق اصلاح متان با بخار، با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای همراه است، به ویژه به دلیل انتشار CO₂ در طول این فرآیند. انتشار متان فراری نیز به تأثیرات زیست‌محیطی آن می‌افزاید. علی‌رغم استفاده گسترده از هیدروژن خاکستری، عملکرد زیست‌محیطی آن در مقایسه با سایر روش‌های تولید ضعیف است. ابتکاراتی مانند جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS) هدفشان کاهش اثرات زیست‌محیطی آن است، اما همچنان نگرانی‌هایی در مورد پایداری و نقش آن در تغییرات اقلیمی وجود دارد (Ajanovic et al., 2022). همچنین لازم به ذکر است که سیستم‌های IEPG می‌توانند عواقب زیست‌محیطی منفی نیز داشته باشند (Breeze, 2018). استخراج، فرآوری و حمل‌ونقل گاز طبیعی می‌تواند منجر به انتشار متان، که یک گاز گلخانه‌ای قوی است و به پدیده تغییرات اقلیمی کمک می‌کند، شود. علاوه بر این، توسعه زیرساخت‌های گاز می‌تواند به تخریب زیستگاه‌ها، کاهش تنوع زیستی و سایر اثرات منفی زیست‌محیطی، به ویژه در اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر منجر شود. همچنین، استفاده از گاز طبیعی به عنوان یک سوخت میانی در سیستم‌های IEPG می‌تواند انتقال به سیستم‌های انرژی کاملاً تجدیدپذیر را به تأخیر بیندازد و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را طولانی کند و پیشرفت به سوی دستیابی به اهداف پایداری بلندمدت را مختل کند. بنابراین، در حالی که سیستم‌های IEPG دارای پتانسیل زیادی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی هستند، ضروری است که به دقت خطرات و معاوضه‌های مرتبط را ارزیابی کنیم تا مزایای ادغام را بهینه کرده و از تأثیرات زیست‌محیطی منفی جلوگیری کنیم.

مقاله (Ren et al., 2021) بهره‌وری استفاده از منابع و تأثیرات زیست‌محیطی یک سیستم تولید برق با چرخه ترکیبی گازی-ساز یکه‌پارچه با و بدون جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) را مقایسه می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که هزینه سرمایه‌گذاری با ادغام سیستم اندکی افزایش می‌یابد و پایداری با ارزش‌های مالیات بر CO₂ تحت تأثیر قرار می‌گیرد. یک استراتژی برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انرژی یکه‌پارچه برق-گاز-گرمایش در مرجع (Liu et al., 2021) معرفی شده است. هدف این استراتژی دستیابی به بالاترین مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ممکن است. علاوه بر این، یک مدل جدید برای اندازه‌گیری انعطاف‌پذیری بر اساس ذخیره مازاد و ذخیره گاز پیشنهاد شده است. این مطالعه باید موانع مقرراتی یا سیاستی احتمالی که می‌تواند پذیرش و اجرای گسترده سیستم‌های IEPG را محدود کند، در نظر بگیرد.



۸. چالش های فعلی و مسیرهای تحقیقاتی آینده:

اگرچه شبکه های تبدیل برق به گاز (P2G) مزایای مختلفی مانند امکان ذخیره سازی انرژی در مقیاس بزرگ و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر را ارائه می دهند، برنامه ریزی و بهره برداری از آنها چالش های منحصر به فردی را به همراه دارد. اطمینان از برنامه ریزی و بهره برداری مؤثر از شبکه های P2G در میان منابع انرژی متنوع، بارهای متغیر و پویایی های پیچیده سیستم بسیار حیاتی است. عواملی مانند نوسانات جریان گاز و مدیریت سیستم های گاز فشار قوی باید در طول برنامه ریزی شبکه مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، عدم قطعیت های تولید برق تجدیدپذیر، مانند تغییرات در دسترسی به انرژی خورشیدی و بادی، برنامه ریزی و تلاش های بهره برداری برای سیستم های IEPG را پیچیده می کند.

تحقیقات جاری به دنبال توسعه تکنیک های پیشرفته ای است که برای بهینه سازی برنامه ریزی و بهره برداری از سیستم های P2G طراحی شده اند. این شامل توسعه روش های بهینه سازی پیشرفته است که به طور خاص برای شبکه های P2G طراحی شده اند. این روش ها هدفشان حداکثر کردن بهره وری و قابلیت اطمینان سیستم های IEPG است، در حالی که محدودیت ها و عدم قطعیت های مختلف را در نظر می گیرند. علاوه بر این، الگوریتم های پیشرفته مدیریت انرژی در حال توسعه هستند تا بهره برداری از سیستم های IEPG را بهینه کنند، قابلیت اطمینان آنها را افزایش دهند و کارایی انرژی آنها را به حداکثر برسانند.

علیرغم پیشرفت ها، هنوز فرصت هایی برای بهبود روش های برنامه ریزی و بهره برداری از شبکه های P2G وجود دارد. تحقیقات آینده می تواند ابزارهای مدل سازی و شبیه سازی نوآورانه را بررسی کند، تاب آوری شبکه را بهینه کند و ادغام با سایر زیرساخت های انرژی را بررسی کند تا مزایای سیستم های IEPG به حداکثر برسد.

- واحدهای P2G به منابع CO₂ با خلوص بالا نیاز دارند، اما تأثیر تأمین CO₂ بر برنامه ریزی سیستم های یکپارچه انرژی و گاز (IEGS) همچنان کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، هزینه های جذب کربن اغلب از مدل های بهینه سازی حذف می شود که نشان دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

- هزینه ها و محدودیت های فنی مرتبط با تأمین آب برای واحدهای P2G به طور ناکافی در ادبیات موجود بررسی شده است، علی رغم اینکه این موضوعات می توانند به طور قابل توجهی بر برنامه ریزی بهینه IEPG تأثیر بگذارند. تحقیقات فعلی اغلب فرض می کنند که آب به طور نامحدود در دسترس است و هزینه های مربوط به تأمین آب را نادیده می گیرند.

- اگرچه واحدهای P2G به طور معمول گاز طبیعی مصنوعی (SNG) تولید می کنند، استفاده مستقیم از H₂ در توربین های گازسوز یا سلول های سوختی هیدروژنی مزایای بهره وری را ارائه می دهد. با این حال، این جایگزین در تحقیقات معاصر کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

- بهبود دقت مدل های بهینه سازی برای برنامه ریزی مؤثر در سیستم های برق و گاز بسیار مهم است. بسیاری از تلاش های تحقیقاتی موجود به تقریبی ها متکی هستند، مانند روش DC برای مدل سازی جریان برق، که ممکن است دقت را محدود کند. توسعه مدل های دقیق محذب یا خطی برای اطمینان از دستیابی به حل های جهانی بسیار حیاتی است.

- پرداختن به عدم قطعیت ها، هم در کوتاه مدت و هم در بلندمدت، یک ملاحظه حیاتی در برنامه ریزی سیستم انرژی است. با این حال، فرآیند برنامه ریزی مشترک نیاز به بررسی بیشتر رویکردهای احتمالاتی برای مدیریت مؤثر عدم قطعیت ها و تأثیرات آنها بر عملکرد و بهره برداری سیستم دارد.

- با رشد نقش وسایل نقلیه هیبریدی در حمل و نقل، تقاضا برای ایستگاه های سوخت هیبریدی به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت و بر سیستم های انرژی تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین، گنجاندن این ایستگاه ها به عنوان بارهای اضافی در فرآیندهای برنامه ریزی شبکه مشترک ضروری است. علاوه بر این، اولویت دادن به ادغام با سایر شبکه ها، مانند شبکه های حمل و نقل، یک چالش کلیدی است که نیاز به توجه دارد تا هماهنگی بی نقص و عملکرد بهینه سیستم تضمین شود.

۹. نتیجه گیری

سیستم های IEPG به عنوان فناوری های کارآمد برای ادغام منابع برق، بارها، انرژی های تجدیدپذیر، دستگاه های ذخیره سازی انرژی و زیرساخت های گاز شناخته می شوند. با این حال، بهره برداری و هماهنگی مؤثر در سیستم های IEPG برای اطمینان از عملیات قابل اعتماد، پایدار و بهینه ضروری است. این مقاله یک مرور جامع و عمیق از جنبه های برنامه ریزی و بهره برداری از سیستم های IEPG ارائه می دهد که بر اساس ادبیات روز دنیا است. روش های مختلف برنامه ریزی، استراتژی های بهره برداری و مکانیزم های هماهنگی برای سیستم های IEPG با در نظر گرفتن عدم قطعیت های مختلف به طور انتقادی بررسی شده اند. تأثیرات انرژی های تجدیدپذیر و فناوری های ذخیره سازی بر برنامه ریزی و بهره برداری از سیستم های IEPG به طور کامل بررسی شده است. علاوه بر این، این مرور سیاست ها و مقررات مربوط به سیستم های IEPG را با در نظر گرفتن مطالعات موردی در کشورهای مختلف مورد بحث قرار می دهد. بحث های مربوط به تأثیرات زیست محیطی سیستم های IEPG می تواند به دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک کند. شکاف های تحقیقاتی شناسایی شده در سیستم های IEPG فرصتهایی را برای تلاش های تحقیقاتی آینده و روش های پیشرفته فراهم می کند. این مقاله به عنوان یک منبع مهم برای پژوهشگران و متخصصان



13th International Conference on

Electrical, Electronic
Engineering and Smart Grids

Event Place: Tbilisi, Georgia

www.Eesconf.ir

سیزدهمین کنفرانس بین المللی

مهندسی برق، الکترونیک و شبکه های هوشمند | گرجستان



13th International Conference on Electrical, Electronic Engineering and Smart Grids
مجله معتبر بین المللی ۲۱ شهریور ماه ۱۴۰۲

صنعت که به دنبال راهنمایی در زمینه برنامه ریزی، بهره برداری، سیاست گذاری و مقررات، و تأثیرات زیست محیطی سیستم های IEPG هستند، خدمت می کند. در نهایت، مسیرهای تحقیقاتی آینده برای ارائه راهنمایی در جهت پیشرفت های بیشتر در زمینه سیستم های یکپارچه برق و گاز ارائه شده اند.

منابع:

- [۱] Q. Guo, Y. Wang, and X. Dong, "Effects of smart city construction on energy saving and CO2 emission reduction: Evidence from China," **Applied Energy**, vol. 313, p. 118879, 2022.
- [۲] M. S. Alam, F. S. Al-Ismail, and M. A. Abido, "Power management and state of charge restoration of direct current microgrid with improved voltage-shifting controller," **Journal of Energy Storage**, vol. 44, p. 103253, 2021.
- [۳] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, and R. Purcell, "CO2 recycling by reaction with renewably-generated hydrogen," **International Journal of Greenhouse Gas Control**, vol. 4, no. 1, pp. 44–50, 2010.
- [۴] D. Alkano and J. M. Scherpen, "Distributed supply coordination for power-to-gas facilities embedded in energy grids," **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 9, no. 2, pp. 1012–1022, 2016.
- [5] C. Gu, C. Tang, Y. Xiang, and D. Xie, "Power-to-gas management using robust optimisation in integrated energy systems," **Applied Energy**, vol. 236, pp. 681–689, 2019.
- [۶] A. Maroufmashat and M. Fowler, "Low-carbon transportation pathways through power-to-gas," in **2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)**. IEEE, 2017, pp. 353–356.
- [۷] Y. Cheng, N. Zhang, Y. Wang, J. Yang, C. Kang, and Q. Xia, "Modeling carbon emission flow in multiple energy systems," **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 4, pp. 3562–3574, 2018.
- [۸] W. Gu, Z. Wu, R. Bo, W. Liu, G. Zhou, W. Chen, and Z. Wu, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, vol. 54, pp. 26–37, 2014.
- [۹] S. F. Santos, D. Z. Fitiwi, M. R. Cruz, C. M. Cabrita, and J. P. Catalao, "Impacts of optimal energy storage deployment and network reconfiguration on renewable integration level in distribution systems," **Applied Energy**, vol. 185, pp. 44–55, 2017.
- [۱۰] T. Fang and R. Lahdelma, "Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method," **Applied Energy**, vol. 162, pp. 723–732, 2016.
- [۱۱] A. Lorestani and M. Ardehali, "Optimization of autonomous combined heat and power system including PVT, WT, storages, and electric heat utilizing novel evolutionary particle swarm optimization algorithm," **Renewable Energy**, vol. 119, pp. 490–503, 2018.

- [۱۲] W. Li, T. Li, H. Wang, J. Dong, Y. Li, D. Cui, W. Ge, J. Yang, and M. Onyeka Okoye, "Optimal dispatch model considering environmental cost based on combined heat and power with thermal energy storage and demand response," *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 817, 2019.
- [۱۳] H. Wang, J. Yang, Z. Chen, G. Li, J. Liang, Y. Ma, H. Dong, H. Ji, and J. Feng, "Optimal dispatch based on prediction of distributed electric heating storages in combined electricity and heat networks," *Applied Energy*, vol. 267, p. 114879, 2020.
- [۱۴] G. Zhang, W. Wang, Z. Chen, R. Li, and Y. Niu, "Modeling and optimal dispatch of a carbon-cycle integrated energy system for low-carbon and economic operation," *Energy*, vol. 240, p. 122795, 2022.
- [۱۵] J. Duan, Y. Yang, and F. Liu, "Distributed optimization of integrated electricity-natural gas distribution networks considering wind power uncertainties," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 135, p. 107460, 2022.
- [16] R.-P. Liu, Y. Hou, Y. Li, S. Lei, W. Wei, and X. Wang, "Sample robust scheduling of electricity-gas systems under wind power uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5889–5900, 2021.
- [۱۷] J. Yang, N. Zhang, C. Kang, and Q. Xia, "Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 2087–2097, 2017.
- [۱۸] C. Duan, L. Jiang, W. Fang, and J. Liu, "Data-driven affinely adjustable distributionally robust unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1385–1398, 2017.
- [۱۹] A. Najafi, M. Pourakbari-Kasmaei, M. Jasinski, M. Lehtonen, and Z. Leonowicz, "A max–min–max robust optimization model for multicarrier energy systems integrated with power to gas storage system," *Journal of Energy Storage*, vol. 48, p. 103933, 2022.
- [۲۰] Y.-Z. Meng, R.-R. Chen, and T.-H. Deng, "Two-stage robust optimization of power cost minimization problem in gunbarrel natural gas networks by approximate dynamic programming," *Petroleum Science*, 2022.
- [۲۱] C. Jiang, H. Xie, Z. Zhang, and X. Han, "A new interval optimization method considering tolerance design," *Engineering Optimization*, vol. 47, no. 12, pp. 1637–1650, 2015.
- [۲۲] K. Lichtenegger, A. Leitner, T. Marzinger, C. Mair, A. Moser, D. Woss, C. Schmidl, and T. Proll, "Decentralized heating grid operation: A comparison of centralized and agent-based optimization," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 21, p. 100300, 2020.
- [۲۳] F. Alismail, P. Xiong, and C. Singh, "Optimal wind farm allocation in multi-area power systems using distributionally robust optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 536–544, 2017.
- [۲۴] T. A. Antunes, R. Castro, P. J. Santos, and A. J. Pires, "Power-from-shore optioneering for integration of offshore renewable energy in oil and gas production," *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 151, 2023.
- [۲۵] A. Martinez-Mares, C. R. Fuerte-Esquivel, and I. de Ingenieria, "Integrated energy flow analysis in natural gas and electricity coupled systems," in *2011 North American Power Symposium*. IEEE, 2011, pp. 1–7.

- [۲۶] M. Bailera, P. Lisbona, E. Llera, B. Pena, and L. M. Romeo, "Renewable energy sources and power-to-gas aided cogeneration for non-residential buildings," **Energy**, vol. 181, pp. 226–238, 2019.
- [۲۷] R. Villena-Ruiz, A. Honrubia-Escribano, and E. Gomez-Lazaro, "Solar pv and wind power as the core of the energy transition: Joint integration and hybridization with energy storage systems," **Energy**, p. 2917, 2023.
- [۲۸] Z. Yuan and J. Li, "Photovoltaic-penetrated power distribution networks' resiliency-oriented day-ahead scheduling equipped with power-to-hydrogen systems: A risk-driven decision framework," **Energy**, p. 131115, 2024.
- [۲۹] Y. Zhao, X. Xu, M. Qadrdan, and J. Wu, "Optimal operation of compressor units in gas networks to provide flexibility to power systems," **Applied Energy**, vol. 290, p. 116740, 2021.
- [۳۰] H. Ameli, M. Qadrdan, and G. Strbac, "Value of gas network infrastructure flexibility in supporting cost effective operation of power systems," **Applied Energy**, vol. 202, pp. 571–580, 2017.
- [۳۱] K. Rowe, G. Mokryani, K. Cooke, F. Campean, and T. Chambers, "Bi-level optimal sizing, siting and operation of utility-scale multi-energy storage system to reduce power losses with peer-to-peer trading in an electricity/heat/gas integrated network," **Journal of Energy Storage**, vol. 83, p. 110738, 2024.
- [۳۲] L. Zhang, C. Jia, F. Bai, W. Wang, S. An, K. Zhao, Z. Li, J. Li, and H. Sun, "A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies," **Fuel**, vol. 355, p. 129455, 2024.
- [۳۳] Y.-G. Son, J. Kwak, S.-J. Park, and S.-Y. Kim, "Enhancing target benefits of power system stakeholders: A columns and constraint generation-based power-to-gas linked economic dispatch," **Electric Power Systems Research**, vol. 229, p. 110124, 2024.
- [۳۴] J. Zhai, Y. Jiang, X. Chen, J. Li, C. N. Jones, and X.-P. Zhang, "Asynchronous decentralized adjustable robust operation for multi-area integrated electricity–gas systems considering wind power uncertainty," **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, vol. 147, p. 108882, 2023.
- [۳۵] G. Marin, B. Osipov, A. Titov, and A. Akhmetshin, "Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system," **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 48, no. 12, pp. 4543–4550, 2023.
- [۳۶] F. Saadaoui and S. B. Jabeur, "Analyzing the influence of geopolitical risks on european power prices using a multiresolution causal neural network," **Energy Economics**, vol. 124, p. 106793, 2023.
- [۳۷] M. Feofilovs, A. Gravelins, A. J. Pagano, and F. Romagnoli, "Increasing resilience of the natural gas system with implementation of renewable methane in the context of latvia: a system dynamics model," **Energy Procedia**, vol. 158, pp. 3944–3950, 2019.
- [۳۸] H. Mehrjerdi, H. Saboori, and S. Jadid, "Power-to-gas utilization in optimal sizing of hybrid power, water, and hydrogen microgrids with energy and gas storage," **Journal of Energy Storage**, vol. 45, p. 103745, 2022.
- [۳۹] S. Puchalapalli, S. K. Tiwari, B. Singh, and P. K. Goel, "A microgrid based on wind-driven DFIG, DG, and solar PV array for optimal fuel consumption," **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 56, no. 5, pp. 4689–4699, 2020.

- [۴۰] X. Xu, K. Li, H. Jia, and Y. Guo, "Interactions between gas networks and microgrids through microturbines," in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [۴۱] A. Perna, L. Moretti, G. Ficco, G. Spazzafumo, L. Canale, and M. Dell'Isola, "SNG generation via power to gas technology: Plant design and annual performance assessment," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, p. 8443, 2020.
- [۴۲] M. Gotz, J. Lefebvre, F. Mors, A. M. Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, and T. Kolb, "Renewable power-to-gas: A technological and economic review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, 2016.
- [۴۳] R. Chein, W. Chen, and C. Yu, "Numerical simulation of carbon dioxide methanation reaction for synthetic natural gas production in fixed-bed reactors," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 29, pp. 243–251, 2016.
- [۴۴] M. Khatibi, A. Rabiee, and A. Bagheri, "Integrated electricity and gas systems planning: New opportunities, and a detailed assessment of relevant issues," *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6602, 2023.
- [۴۵] S. Zhan, P. Hou, G. Yang, and J. Hu, "Distributionally robust chance-constrained flexibility planning for integrated energy system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 135, p. 107417, 2022.
- [۴۶] M. Farrokhifar, Y. Nie, and D. Pozo, "Energy systems planning: A survey on models for integrated power and natural gas networks coordination," *Applied Energy*, vol. 262, p. 114567, 2020.
- [۴۷] Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, J. Zhao, and Y. Xue, "Carbon-oriented electricity network planning and transformation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 1034–1048, 2020.
- [۴۸] M. Qadrdan, M. Chaudry, N. Jenkins, P. Baruah, and N. Eyre, "Impact of transition to a low carbon power system on the GB gas network," *Applied Energy*, vol. 151, pp. 1–12, 2015.
- [۴۹] N. E. Koltsaklis and M. C. Georgiadis, "A multi-period, multi-regional generation expansion planning model incorporating unit commitment constraints," *Applied Energy*, vol. 158, pp. 310–331, 2015.
- [۵۰] G. Qin, Q. Yan, D. M. Kammen, C. Shi, and C. Xu, "Robust optimal dispatching of integrated electricity and gas system considering refined power-to-gas model under the dual carbon target," *Journal of Cleaner Production*, vol. 371, p. 133451, 2022.
- [۵۱] Z. Wang, X. Li, Y. Wang, Y. Liang, Y. Hu, J. Li, H. Liu, and X. Zheng, "An integrated electricity-gas energy system planning method that takes into account the reliability of energy supply," in *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*. IEEE, 2022, pp. 347–351.
- [۵۲] B. Odetayo, J. MacCormack, W. D. Rosehart, and H. Zareipour, "A sequential planning approach for distributed generation and natural gas networks," *Energy*, vol. 127, pp. 428–437, 2017.
- [۵۳] S. H. R. Hosseini, A. Allahham, S. L. Walker, and P. Taylor, "Uncertainty analysis of the impact of increasing levels of gas and electricity," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 3171–3182, 2017.

- [۵۴] C. H. Jackson, L. D. Sharples, and S. G. Thompson, "Structural and parameter uncertainty in bayesian cost-effectiveness models," **Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics**, vol. 59, no. 2, pp. 233–253, 2010.
- [۵۵] J. R. Birge and F. Louveaux, **Introduction to stochastic programming**. Springer Science & Business Media, 2011.
- [۵۶] J. H. Zhao, Z. Y. Dong, P. Lindsay, and K. P. Wong, "Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 24, no. 1, pp. 479–488, 2009.
- [۵۷] Z. Siqin, D. Niu, X. Wang, H. Zhen, M. Li, and J. Wang, "A two-stage distributionally robust optimization model for P2G-CCHP microgrid considering uncertainty and carbon emission," **Energy**, vol. 260, p. 124796, 2022.
- [۵۸] Y. Li, F. Zhang, Y. Li, and Y. Wang, "An improved two-stage robust optimization model for CCHP-P2G microgrid system considering multi-energy operation under wind power outputs uncertainties," **Energy**, vol. 223, p. 120048, 2021.
- [۵۹] Y. Wang, Y. Yang, H. Fei, M. Song, and M. Jia, "Wasserstein and multivariate linear affine based distributionally robust optimization for CCHP-P2G scheduling considering multiple uncertainties," **Applied Energy**, vol. 306, p. 118034, 2022.
- [۶۰] J. B. Nunes, N. Mahmoudi, T. K. Saha, and D. Chattopadhyay, "A stochastic integrated planning of electricity and natural gas networks for Queensland, Australia considering high renewable penetration," **Energy**, vol. 153, pp. 539–553, 2018.
- [۶۱] H. B. Yamchi, A. Safari, and J. M. Guerrero, "A multi-objective mixed integer linear programming model for integrated electricity-gas network expansion planning considering the impact of photovoltaic generation," **Energy**, vol. 222, p. 119933, 2021.
- [۶۲] Y. Zhang, Y. Hu, J. Ma, and Z. Bie, "A mixed-integer linear programming approach to security-constrained co-optimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 33, no. 6, pp. 6368–6378, 2018.
- [۶۳] C. A. Saldarriaga, R. A. Hincapié, and H. Salazar, "A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 28, no. 4, pp. 4052–4063, 2013.
- [۶۴] Y. Liu and T. Liu, "Research on system planning of gas-power integrated system based on improved two-stage robust optimization and non-cooperative game method," **IEEE Access**, vol. 9, pp. 79169–79181, 2021.
- [۶۵] W. Pan, Y. Li, Z. Guo, and Y. Zhang, "Interdependent expansion planning for resilient electricity and natural gas networks," **Processes**, vol. 12, no. 4, p. 775, 2024.
- [۶۶] W. Chunyi, L. Lei, Y. Xiaoting, Z. Lele, H. Qingqiang, C. Miao, and Z. Qi, "Multi-objective optimization planning for integrated electricity and gas system considering dynamics of gas system," in **The Purple Mountain Forum on Smart Grid Protection and Control**. Springer, 2022, pp. 106–122.
- [۶۷] K. Wen, Y. Lu, M. Lu, W. Zhang, M. Zhu, D. Qiao, F. Meng, J. Zhang, J. Gong, and B. Hong, "Multi-period optimal infrastructure planning of natural gas pipeline network system integrating flowrate allocation," **Energy**, vol. 257, p. 124745, 2022.

- [۶۸]K. A. Sidarto, A. Kania, L. Mucharam, R. A. Widhymarmanto et al., “Determination of gas pressure distribution in a pipeline network using the Broyden method.” **Journal of Engineering & Technological Sciences**, vol. 49, no. 6, 2017.
- [۶۹]C. A. Fletcher, **Computational Techniques for Fluid Dynamics 2: Specific Techniques for Different Flow Categories**. Springer Science & Business Media, 2012.
- [۷۰]T. Klatzer, U. Bachhiesl, and S. Wogrin, “State-of-the-art expansion planning of integrated power, natural gas, and hydrogen systems,” **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 47, no. 47, pp. 20585–20603, 2022.
- [۷۱]B. C. Erdener, B. Sergi, O. J. Guerra, A. L. Chueca, K. Pambour, C. Brancucci, and B.-M. Hodge, “A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines,” **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 48, no. 14, pp. 5595–5617, 2023.
- [۷۲]H. Fan, Q. Yuan, S. Xia, J. Lu, and Z. Li, “Optimally coordinated expansion planning of coupled electricity, heat and natural gas infrastructure for multi-energy system,” **IEEE Access**, vol. 8, pp. 91139–91149, 2020.
- [۷۳]Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, and X. Sun, “Coordinated planning of electricity and hydrogen networks with hydrogen supply chain for fuel cell electric vehicles,” **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 14, no. 2, pp. 1010–1023, 2022.
- [۷۴]J. Liu, W. Sun, and G. P. Harrison, “Optimal low-carbon economic environmental dispatch of hybrid electricity-natural gas energy systems considering P2G,” **Energies**, vol. 12, no. 7, p. 1355, 2019.
- [۷۵]S. Clegg and P. Mancarella, “Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks,” **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 6, no. 4, pp. 1234–1244, 2015.
- [۷۶]Y. Nie, M. Farrokhifar, and D. Pozo, “Electricity and gas network expansion planning: An ADMM-based decomposition approach,” in **2019 IEEE Milan PowerTech**. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [۷۷]M. Nazari-Heris, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and S. Asadi, “Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive shiftable loads,” **Journal of Cleaner Production**, vol. 244, p. 118769, 2020.
- [۷۸]A. Bianchini, A. Guzzini, M. Pellegrini, C. Sacconi et al., “Analysis of the existing barriers and of the suggested solutions for the implementation of power to gas (P2G) in Italy,” in **Book of Abstracts 5th International Conference on Smart Energy Systems**. Aalborg University, 2019, pp. 110–110.
- [۷۹]C. Tovar-Ramirez, C. Fuerte-Esquivel, A. M. Mares, and J. Sanchez-Garduno, “A generalized short-term unit commitment approach for analyzing electric power and natural gas integrated systems,” **Electric Power Systems Research**, vol. 172, pp. 63–76, 2019.
- [۸۰]W. Su, S. Blumsack, and M. Webster, “A stochastic optimization framework to plan for geographically correlated failures in coupled natural gas and electric power systems,” **Reliability Engineering & System Safety**, p. 110049, 2024.
- [۸۱]Q. Zeng, B. Zhang, J. Fang, and Z. Chen, “A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system,” **Applied Energy**, vol. 200, pp. 192–203, 2017.

[^{۸۲}]H. Yang, P. You, and C. Shang, "Distributed planning of electricity and natural gas networks and energy hubs," **Applied Energy**, vol. 282, p. 116090, 2021.

[^{۸۳}]M. Chaudry, N. Jenkins, M. Qadrdan, and J. Wu, "Combined gas and electricity network expansion planning," **Applied Energy**, vol. 113, pp. 1171–1187, 2014.

[^{۸۴}]N. Yang, T. Qin, L. Wu, Y. Huang, Y. Huang, C. Xing, L. Zhang, and B. Zhu, "A multi-agent game based joint planning approach for electricity-gas integrated energy systems considering wind power uncertainty," **Electric Power Systems Research**, vol. 204, p. 107673, 2022.

[^{۸۵}]B. Zhao, T. Qian, W. Tang, and Q. Liang, "A data-enhanced distributionally robust optimization method for economic dispatch of integrated electricity and natural gas systems with wind uncertainty," **Energy**, vol. 243, p. 123113, 2022.

[^{۸۶}]W. Pan, Y. Li, Z. Guo, and Y. Zhang, "Interdependent expansion planning for resilient electricity and natural gas networks," **Processes**, vol. 12, no. 4, p. 775, 2024.

[^{۸۷}]A. Maroufmashat and M. Fowler, "Transition of future energy system infrastructure through power-to-gas pathways," **Energies**, vol. 10, no. 8, p. 1089, 2017.

[^{۸۸}]Y. Bai, Y. Zhang, X. Zhang, and T. S. Ng, "Business model and supporting policies for projects to implement carbon capture and power-to-gas technologies," **Science of The Total Environment**, vol. 888, p. 164150, 2023.

[^{۸۹}]A. Ratha, A. Schwele, J. Kazempour, P. Pinson, S. S. Torbaghan, and A. Virag, "Affine policies for flexibility provision by natural gas networks to power systems," **Electric Power Systems Research**, vol. 189, p. 106565, 2020.

[^{۹۰}]N. Preston, A. Maroufmashat, H. Riaz, S. Barbouti, U. Mukherjee, P. Tang, J. Wang, E. Haghi, A. Elkamel, and M. Fowler, "How can the integration of renewable energy and power-to-gas benefit industrial facilities? From techno-economic, policy, and environmental assessment," **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 45, no. 51, pp. 26559–26573, 2020.

[^{۹۱}]J. E. Bistline and D. T. Young, "The role of natural gas in reaching net-zero emissions in the electric sector," **Nature Communications**, vol. 13, no. 1, p. 4743, 2022.

[^{۹۲}]P. Bergquist and C. Warshaw, "How climate policy commitments influence energy systems and the economies of US states," **Nature Communications**, vol. 14, no. 1, p. 4850, 2023.

[^{۹۳}]G. Glenk and S. Reichelstein, "Reversible power-to-gas systems for energy conversion and storage," **Nature Communications**, vol. 13, no. 1, p. 2010, 2022.

[^{۹۴}]G. Kreeft, "European legislative and regulatory framework on power-to-gas," 2017.

[^{۹۵}]R. Cardinale, I. Cardinale, and I. Zupic, "The EU's vulnerability to gas price and supply shocks: The role of mismatches between policy beliefs and changing global gas markets," **Energy Economics**, p. 107383, 2024.

[^{۹۶}]V. Bendikova, T. Patterson, S. Savvas, and S. Esteves, "Economic and policy requirements for the deployment of power to methane (P2M) for grid-scale energy management," **Energy Reports**, vol. 10, pp. 4271–4285, 2023.

[^{۹۷}]A. Zlotnik, L. Roald, S. Backhaus, M. Chertkov, and G. Andersson, "Control policies for operational coordination of electric power and natural gas transmission systems," in **2016 American Control Conference (ACC)**. IEEE, 2016, pp. 7478–7483.

- [۹۸] K. A. Babatunde, F. F. Said, N. G. M. Nor, R. A. Begum, and M. A. Mahmoud, "Coherent or conflicting? Assessing natural gas subsidy and energy efficiency policy interactions amid CO2 emissions reduction in Malaysia electricity sector," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123374, 2021.
- [۹۹] J. Lukens, "Pricing an integrated energy transmission grid: Are FERC's natural gas and electric power transmission pricing policies on a collision course?" *The Electricity Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 34–40, 2000.
- [۱۰۰] F. Liu, J. Duan, C. Wu, and Q. Tian, "Risk-averse distributed optimization for integrated electricity-gas systems considering uncertainties of wind-PV and power-to-gas," *Renewable Energy*, p. 120358, 2024.
- [۱۰۱] R. Qiu, H. Zhang, G. Wang, Y. Liang, and J. Yan, "Green hydrogen-based energy storage service via power-to-gas technologies integrated with multi-energy microgrid," *Applied Energy*, vol. 350, p. 121716, 2023.
- [۱۰۲] M. S. Ahmad, M. S. Ali, and N. Abd Rahim, "Hydrogen energy vision 2060: Hydrogen as energy carrier in Malaysian primary energy mix—developing P2G case," *Energy Strategy Reviews*, vol. 35, p. 100632, 2021.
- [۱۰۳] P. Partidario, R. Aguiar, P. Martins, C. Rangel, and I. Cabrita, "The hydrogen roadmap in the Portuguese energy system—developing the P2G case," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 47, pp. 25646–25657, 2020.
- [۱۰۴] P. Fernandez-Arias, A. Anton-Sancho, G. Lampropoulos, and D. Vergara, "On green hydrogen generation technologies: A bibliometric review," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 2524, 2024.
- [۱۰۵] A. Ajanovic, M. Sayer, and R. Haas, "The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 57, pp. 24136–24154, 2022.
- [۱۰۶] P. Breeze, "The environmental impact of energy storage technologies," in *Power System Energy Storage Technologies*. Academic Press, 2018, pp. 79–84.
- [۱۰۷] S. Ren, X. Feng, and Y. Wang, "Energy evaluation of the integrated gasification combined cycle power generation systems with a carbon capture system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111208, 2021.
- [109] J. Liu, W. Sun, and J. Yan, "Effect of P2G on flexibility in integrated power-natural gas-heating energy systems with gas storage," *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 196, 2021.

A comprehensive and critical review on integrated electricity and gas networks

Alireza Ghadiri jafarbiglou¹

**PhD student of Shahid Madani University of
Azerbaijan**

Navid Taghizadeghan Kalantari

**professor of Shahid Madani University of
Azerbaijan**

Sajad Najafi Ravadanegh

professor of Shahid Madani University of Azerbaijan.

1-1-

Abstract - ۲-۱

Renewable energies are widely used to reduce environmental pollution in the face of energy crisis and climate change. Uncertainty in the production of electricity by the main sources of renewable energy such as wind and solar photovoltaic systems has created significant challenges for the operation of distribution networks. Therefore, the adoption of more renewable energy in the power system has faced obstacles. As a possible solution to the well-known global requirements of reducing CO₂ emissions and increasing the use of renewable energies, the concept of Integrated Electricity and Gas (IEPG) systems has evolved. Several models, optimization methods and optimal operation have been introduced in the literature using power-to-gas (P2G) techniques, carbon capture systems (CCS), gas turbines, co-generation of electricity and heat (CHP), and micro-gas turbine modules. Also, for safe, stable and reliable operation of IEPG systems, storage devices are adequately integrated in both electricity and gas networks. This paper provides a comprehensive review of IEPG systems and addresses issues such as uncertainties, optimizations, environmental impacts, policies and regulations, planning and modeling. The challenges and opportunities of IEPG networks have been widely discussed. The advantages and disadvantages of various topologies of IEPG systems are thoroughly documented, making this paper a valuable resource for industry professionals and academics. Key research gaps have been identified that can be filled by advanced technologies. Readers will benefit from this review with an understanding of the current state of IEPG systems and the need for further research in this area

1-3- Keywords: Electricity, gas network, carbon absorption system, renewable energy, uncertainty