بهره‌برداری هماهنگ در یک شبکه توزیع تجمیعی برق و گاز شامل سامانه‌های CCHP و منابع انرژی تجدیدپذیر

سامدین انصاری ارده[۱]، محمد تبریزیان*[۲]، حمیدرضا شاهمیرزاد[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، شرکت ایران‌خودرو، تهران، ایران
samedin.ansari@gmail.com
*۲- استادیار، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
mm_tabrizian@yahoo.com
۳- کارشناس ارشد، گروه برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
hr.shahmirzad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۵

چکیده: در این مقاله، بهره‌برداری هماهنگ در یک شبکه توزیع تجمیعی برق و گاز شامل سیستم‌های CCHP و منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن پخش بار متناوب در شبکه برق و محاسبه جریان گاز در شبکه گاز پیشنهاد می‌شود و روشی کارآمد ارائه می‌گردد تا علاوه بر جلوگیری از انتقال نوسانات توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر به خط فرامنطقه‌ای، استفاده حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر صورت گیرد. مدل پیشنهادی بر روی نمونه شبکه توزیع برق ۳۳ باسه IEEE و شبکه گاز دارای ۲۴ گره آزمایش شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت کلی تنظیم در طرح مرسوم به سرعت با افزایش قیمت واحد افزایش می‌یابد. در حالی که در طرح پیشنهادی، هزینه تنظیم پایدار باقی می‌ماند و به آرامی افزایش می‌یابد. هنگامی که هزینه تنظیم واحد بالا باشد، مزیت اقتصادی طرح پیشنهادی بیشتر نمایان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تولید همزمان برق و گرمایش و سرمایش، منابع تولید پراکنده، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه گاز

۱- مقدمه

با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع، نوسانات خطی ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر دارای تولید نوسانی، تأثیرات مخربی بر امنیت و قابلیت اطمینان شبکه اصلی ایجاد می‌کند. بنابراین در شبکه توزیع سهولت در تنظیم بار قدرت شبکه اصلی، به حداکثر رساندن استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین تثبیت نوسانات قدرت خط انتقال مورد نیاز است. در این تحقیق استراتژی بهره‌برداری هماهنگ در یک شبکه توزیع تجمیعی برق و گاز شامل سیستم‌های CCHP و منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن جریان برق AC در شبکه برق و محاسبه جریان گاز در شبکه گاز پیشنهاد شده است. علاوه بر این، براساس مدل‌سازی ویژگی‌های بیرونی اتصال چند انرژی غیرخطی در سیستم CCHP، نوسانات انرژی منابع تجدیدپذیر به شبکه توزیع گاز و سیستم خنک کننده یا حرارتی بواسطه عملیات بهره‌برداری چند CCHP منتقل می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

ظرفیت رمپینگ MGT	$P_i^{pgu,ramp}$	قدرت سرمایش/گرمایش دادن توسط گاز طبیعی(MW)	q_{gas}
پایین ترین سطح ولتاژ گره(کیلوولت)	V_i^{min}	قدرت خنک کننده/حرارت دادن توسط برق(MW)	q_{ele}
بالا ترین سطح ولتاژ گره(کیلوولت)	V_i^{max}	شاخص زمان(۱۵ دقیقه)	t
پیش بینی توان اکتیو RES	$P_{i,t}^{fore}$	شاخص گره شبکه	$l\ ,j\ ,k$
جریان گاز گره بار(kg/s)	$g_{i,t}^{load}$	شاخص شبکه برق	e
حد بالای فشار گاز گره(MPa)	P_i^{min}	شاخص شبکه گاز	g
حد پایین فشار گاز گره(MPa)	P_i^{max}	قیمت برق($/MWh)	$P_{ele,t}$
مصرف انرژی سرمایش/گرمایش(MWh)	E_i^{use}	قیمت گاز طبیعی($/MWh)	$P_{gas,t}$
درجه حرارت داخلی(F)	T_t^{in}	جریمه خرابی توان($/MWh)	P_{elecut}
دما در فضای باز(F)	T_t^{out}	مجازات قطع کردن گاز طبیعی($/MWh)	P_{gascut}
ظرفیت مخزن ذخیره سازی(MWh)	ES_i^{max}	هزینه تنظیم مقررات نوسان برق($/MWh)	P_{res}
تبادل توان اکتیو در خط اصلی (MW)	$P_{i,t}^{grid}$	بخش واقعی از ماتریس ادمیتانس	G_{ij}
تبادل توان راکتیو در خط(MVar)	$g_{i,t}^{grid}$	بخش موهومی از ماتریس ادمیتانس	B_{ij}
جریان حجم گاز وارد شده به شبکه(kg/s)	$g_{i,t}^{total}$	اختلاف ارتفاع بین گره ها(متر)	Δh
نوسان برق خط(MW)	$\Delta P_{i,t}^{grid}$	قطر خط لوله(متر)	$D_{i,k}$
خروجی اکتیو MGT	$P_{i,t}^{pgu}$	ضریب اصطکاک دارسی	λ
خروجی راکتیوMGT	$q_{i,t}^{pgu}$	فاکتور فشرده سازی گاز	Z
خروجی اکتیو RES	$P_{i,t}^{renew}$	ثابت گاز(k/J)	R
خروجی راکتیو RES	$q_{i,t}^{renew}$	طول خط لوله(متر)	$L_{i,k}$
بخش واقعی ولتاژ گره	$e_{i,t}$	دمای متوسط جریان گاز(K)	$TEMP$
بخش موهومی ولتاژ گره	$f_{i,t}$	بازده بویلر بازیابی	η_{re}
وضعیت روشن/خاموشMGT	$I_{i,t}$	بازده گرمایی بویلر کمکی	η_{aux}
کاهش توانRES	$P_{i,t}^{renewcut}$	بازده خنک کننده چیلر پریز از مرکز	η_{ec}
جریان گاز در خط لوله(کیلوگرم در ثانیه)	$g_{i,t,k}^{line}$	ضریب نفوذ حرارتی	ε
نرخ سوخت گاز MGT	$g_{i,t}^{pgu}$	هدایت حرارتی	A
میزان سوخت گاز بویلر کمکی(kg/s)	$g_{i,t}^{aux}$	بار اکتیو(MW)	$P_{i,t}^{load}$
فشار گاز گره(MPa)	$P_{i,t}$	بار راکتیو(MVar)	$q_{i,t}^{load}$
تقاضای برق چیلر گریز از مرکز(MW)	$P_{i,t}^{ec}$	ظرفیت ترانسفوراتور(MVA)	S_i^{max}
قدرت خنک کنندگی چیلر سانتریفیوژ(MW)	$q_{i,t}^{ec}$	حد بالایی نوسان برق خط اصلی(MW/h)	$P_i^{grid,ramp}$
قدرت گرمایش دیگ کمکی(MW)	$h_{i,t}^{aux}$	خروجی اکتیو پایین تر از حدMGT	$P_i^{pgu,min}$
انرژی سرد/گرم ذخیره شده در مخزن(MWh)	$ES_{i,t}$	حداکثر حد مجاز اکتیوMGT	$P_i^{pgu,max}$

در تحقیق انجام شده در مرجع[۱] بیان شده است که یک روش اصلی برای افزایش بهره‌وری، استفاده از انرژی خورشیدی در تولید همزمان برق و حرارت است. تحقیقات نشان می‌دهد که مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل قطعات الکتریکی سیستم‌های CHP کافی نیست و مطالعات محدودی در مورد ارزیابی اقتصادی و اگزرژی سیستم‌های CHP[۱] ۱متمرکز خورشیدی وجود دارد. در مرجع[۲] بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی سیستم CHP خورشیدی -هیدروژنی و سیستم قدرت یکپارچه شده با گردآورنده‌های حرارت خورشیدی (SH CHP-ST[۲]) برای تامین برق و حرارت (به عنوان مثال تقاضای آب گرم) دریک برنامه کاربردی انجام می‌شود. یک سیستم خورشیدی-

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

هیدروژنی، یک سیستم تجدیدپذیر با ذخیره‌سازی مبتنی بر هیدروژن است که شامل یک الکترولیزر، یک مخزن هیدروژن و یک سلول سوختی است. سلول سوختی در حین تولید برق حرارت تولید می‌کند که می‌توان آن را بازیابی کرد. در مرجع[۳] بیان شده است که سیستم‌های برق، گاز طبیعی و بخش گرمایشی IENGDH[۳] یکپارچه شده با نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی STCHP[۴] و بویلرهای برقی، یکی از راه‌کارهای موثر برای کاهش مسأله محدودیت‌های باد و خورشید است. با توجه به قابل پیش‌بینی نبودن باد، خورشید و بار دریافتی، یک روش ارزیابی ریسک برای تحلیل سیستم‌های IENGDH با نیروگاه‌های STCHP و بویلرهای برقی پیشنهاد شده است. در مرجع[۴] یک رویکرد احتمالاتی برای اندازه‌گیری بهینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در عدم قطعیت درازمدت در تقاضای انرژی پیشنهاد شده است. همچنین یک چارچوب شبیه‌سازی دینامیکی برای مدل‌سازی دقیق سیستم انرژی تعریف شده است که شامل ارزیابی استراتژی‌های عملیاتی سنتی و بهینه می‌شود. در مرجع[۵]، یک چارچوب بهینه‌سازی کارآمد برای برنامه‌ریزی همزمان تولید انرژی و تعمیرات در نیروگاه CHP ارائه شده است و در بزرگترین کارخانه تولید همزمان برق و حرارت با سوخت زغال سنگ قزاقستان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرجع[۶] یک رویکرد برنامه-نویسی چند سطحی برای بهینه‌سازی مدیریت انرژی MG[۵] مبتنی بر CHP ارائه شده است. با توجه به سر و کار داشتن با عدم اطمینان‌های مختلف، هر سطح به عنوان یک مسأله دو مرحله‌ای تصادفی فرمول‌بندی شده، که در آن ماهیت نوسانی بارهای مصرف کننده، قیمت بازار RT[۶] و سرعت باد با استفاده از تکنیک ARMA[۷]، مدل‌سازی می‌شود. در مرجع[۷] برنامه‌ریزی کوتاه مدت درباره سلول سوختی و CHP مبتنی بر ریز شبکه با در نظر گرفتن کمینه کردن هزینه و انتشار آلاینده‌ها و برنامه واکنش به تقاضای مختلف به عنوان یک مسئله چند هدفه در ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع[۸]عنوان شده که توزیع اقتصادی واحد CHP (CHPED[۸]) با اهداف کاهش هزینه‌های عملیاتی واحدهای CHP، چند قیود مساوی و نامساوی و برق شبکه را برآورده می‌کند. در مرجع[۹] بیان می‌شود که با توجه به مسائلی، از قبیل تلفات گرما در تجهیزات، راندمان کم انرژی، افزایش آلودگی و مصرف سوخت فسیلی، سیستم‌های (CCHP) در دهه گذشته، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این تحقیق، برای به حداقل رساندن مصرف سوخت و آلودگی فسیلی، یک سیستم جدید CCHP از جمله ماژول‌های فتوولتائیک (PV)، توربین‌های بادی و سلول‌های سوختی اکسید جامد (SOFC)[۹] به عنوان اولین محرک‌ها در نظر گرفته شده است. در[۱۰] بیان می‌شود که با تشویق استفاده از LNG (گاز طبیعی مایع) در چین، CCHP که توسط گاز طبیعی کار می‌کند توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است. در مرجع[۱۱] عنوان می‌شود که امروزه سیستم‌های تولید هم‌زمان سرمایش، حرارت و برق به طور گسترده‌ای در ساختمان‌ها به دلیل دوستدار محیط زیست بودن، ویژگی‌های صرفه‌جویی در هزینه بهره‌برداری و صرفه‌جویی در انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتقال حرارت از منبع زمین گرمایی همچنین یک فن‌آوری صرفه‌جویی در انرژی و دوستدار محیط زیست است. در این مقاله، مدل بهینه سیستم اتصال CCHP-GSHP به طور همزمان بر اساس ضوابط محیط زیست، اقتصادی و انرژی ساخته شده است. در مرجع[۱۲] بیان شده است که سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس کوچ CAES[۱۰] ترکیب شده با منابع انرژی تجدید پذیر RES در سیستم انرژی توزیع شده DES[۱۱] رواج بیشتری پیدا می‌کند، و ظرفیت عرضه سیستم برق را بهبود می‌بخشد. به منظور تعادل بار الکتریکی و بهبود کارآیی انرژی سیستم CCHP در سیستم تولید هم‌زمان سرمایش و گرمایش و برق، این مقاله و سیستم CCHP ترکیب شده با انرژی خورشیدی ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده (CCHP-S-CAES)[۱۲] را مطرح کرد. در مرجع[۱۳] بیان شده است که تأثیر اقتصادی و زیست محیطی یک سیستم CCHP نه تنها به ساختار آن بلکه به نحوه کارکرد آن نیز بستگی دارد. در این مقاله یک روش جدید با استفاده از بهینه‌سازی سراسری بارهای جزئی واحد تولید انرژی (PGU) و منحنی‌های عملکرد جدید (NPC)[۱۳]برای بهینه‌سازی عملیات CCHP پیشنهاد می‌شود. بهینه‌سازی سراسری بارهای جزئی PGU برای تقاضاهای زیر و بالای منحنی عملیاتی CCHP بر اساس معیارهای بهینه‌سازی و ویژگی‌های سیستم تعیین می‌شود.

۲- مدلسازی اجزای CCHP

۲-۱- کلیات سیستم

بر اساس مدل‌سازی ویژگی‌های بیرونی اتصال چند انرژی غیر خطی در سیستم CCHP، نوسانات انرژی منابع تجدیدپذیر به شبکه توزیع گاز و سیستم خنک کننده یا حرارتی بواسطه عملیات بهره‌برداری چند CCHP منتقل می‌شود. جریان انرژی در IES[۱۴] همراه با CCHP در شکل (۱) نشان داده شده است.

سیستم CCHP مولفه اتصال حلقه بسته‌ای است که شبکه‌های توزیع برق، شبکه گاز و سیستم خنک‌کننده / گرمایش را به هم وصل می‌کند. یک IES ممکن است شامل چندین سیستم CCHP باشد. این تحقیق ابتدا بصورت ریاضی ویژگی‌های ظاهری انرژی چندگانه متصل به سیستم CCHP را مدل می‌کند. سیستم CCHP شامل توربین گاز MGT[۱۵]، چیلر جذبی، بویلر بازیابی گرما، چیلر گریز از مرکز، دیگ بخار کمکی و مخزن ذخیره‌سازی سرد/گرم است. MGT از گاز طبیعی شبکه گاز برای تولید برق استفاده می‌کند، و این برق را می‌توان به صورت محلی مصرف و یا به شبکه برق تزریق کرد. در تابستان تقاضای گرما به طور کلی خیلی کم است و CCHP در حالت ترکیبی خنک-کننده و برق (CCP) عمل می‌کند. گاز خروجی از دودکش MGT پس از تولید برق به چیلر جذبی منتقل می‌شود که دما و فشار بالای گاز را برای خنک کردن دوباره استفاده کند. در حالی‌که در زمستان بار خنک-کننده کم است و CCHP در حالت ترکیبی گرما و برق (CHP) عمل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

می‌کند. انرژی باقی‌مانده در گاز دودکش با استفاده از دیگ بخار بازیافت برای گرم کردن مجدداً استفاده می‌شود و دیگ کمکی می‌تواند به طور مستقیم از طریق گاز طبیعی گرما را تأمین کند، به طوری که اطمینان از تعادل تامین حرارت وجود داشته باشد. در همین حال مخزن ذخیره-سازی سرد/گرم می‌تواند انعطاف‌پذیری CCHP را بهبود بخشد. روند مدل‌سازی برای هر مولفه سیستم CCHP در زیر نشان داده شده است.

۲-۲- مدلسازی MGT

قدرت خروجی الکتریکی MGT ($p_{i,t}^{pgu}$) به طور مستقیم با نرخ سوخت گاز ($g_{i,t}^{pgu}$) مرتبط است، در این تحقیق، تابع $p_{i,t}^{pgu} = f_{gas}(g_{i,t}^{pgu})$ این رابطه را بیان می‌کند. در همین حال، سرعت جریان حجمی اگزوز $ER_{i,t}$ و درجه حرارت $ET_{i,t}$ نیز مربوط به قدرت خروجی برق MGT است که توسط تابع $ER_{i,t} = f_{rate}(p_{i,t}^{pgu})$ و $ET_{i,t} = f_{temp}(p_{i,t}^{pg})$ شرح داده شده است.

۲-۳- مدلسازی چیلر جذبی

در این تحقیق دو نوع اثربخشی از گازهای گلخانه‌ای لیتیوم بروماید برای سرمایش استفاده می‌شود که قدرت خنک‌کننده مربوط به $ER_{i,t}$ و $ET_{i,t}$ است. تابع $Q_{i,t}^{ac} = f_{cold}(ER_{i,t}, ET_{i,t})$ رابطه بین قدرت خنک کنندگی $Q_{i,t}^{ac}$ و $ER_{i,t}$ و $ET_{i,t}$ را توصیف می‌کند. بنابراین، رابطه بین قدرت خروجی MGT و قدرت خنک‌کننده چیلر جذبی در فرمول زیر نشان داده شده است:

$$Q_{i,t}^{ac} = f_{cold}(ER_{i,t}, ET_{i,t}) = f_{cold}\left(f_{rate}(p_{i,t}^{pgu}), f_{temp}(p_{i,t}^{pgu})\right), f_{cold}^{'}(p_{i,t}^{pgu}) \quad (۱)$$

۲-۴- مدلسازی دیگ بخار بازیابی

انرژی باقی‌مانده در دودکش نیز مربوط به $ER_{i,t}$ و $ET_{i,t}$ است که توسط تابع $h_{i,t}^{pgu} = f_{heat}(ER_{i,t}, ET_{i,t})$ توصیف می‌شود. بنابراین رابطه بین $p_{i,t}^{pgu}$ و $h_{i,t}^{pgu}$ در فرمول زیر نشان داده شده است:

$$h_{i,t}^{pgu} = f_{heat}(ER_{i,t}, ET_{i,t}) = f_{heat}\left(f_{rate}(p_{i,t}^{pgu}), f_{temp}(p_{i,t}^{pgu})\right) \quad (۲)$$

بویلر بازیابی، انرژی موجود در دودکش را مجددا استفاده می‌کند، بنابراین انرژی تولید شده از بویلر بازیابی $h_{i,t}^{re}$ است و همچنین مربوط به $p_{i,t}^{pgu}$ همان‌طور که در فرمول زیر نشان داده شده است:

$$h_{i,t}^{re} = \eta_{re} h_{i,t}^{pgu} = \eta_{re} f_{heat}\left(f_{heat}(p_{i,t}^{pgu}), f_{temp}(p_{i,t}^{pgu})\right) = \eta_{re} f_{heat}^{'}(p_{i,t}^{pgu}) \quad (۳)$$

در اینجا η_{re} راندمان بازیابی گرما است.

۲-۵- مدلسازی چیلر گریز از مرکز و بویلر کمکی

هنگامی که قدرت خنک‌کنندگی چیلر جذبی یا قدرت گرمای دیگ بخار کافی نباشد، چیلر گریز از مرکز یا بویلر کمکی می‌تواند تعادل منبع خنک‌کننده یا حرارت را تضمین کند. کل خنک‌کننده یا گرمایش سیستم CCHP به ترتیب در فرمول‌های زیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که روابط (۴) و (۵) در یک زمان مورد نیاز نیست:

- در مورد تابستان :

$$\boldsymbol{Q_{i,t}^{cchp} = Q_{i,t}^{ac} + Q_{i,t}^{ec} = f_{cold}^{'}(p_{i,t}^{cchp}) + COP.\, p_{i,t}^{ec}} \quad (۴)$$

- در مورد زمستان:

$$\boldsymbol{h_{i,t}^{cchp} = h_{i,t}^{re} + h_{i,t}^{aux} = \eta_{re} f_{heat}^{'}(p_{i,t}^{pgu}) + \eta_{aux} g_{i,t}^{aux}} \quad (۵)$$

در اینجا $Q_{i,t}^{ec}$ توان خنک‌کنندگی چیلر گریز از مرکز است. $h_{i,t}^{aux}$ توان گرمایی بویلر کمکی است. $p_{i,t}^{ec}$ مصرف برق چیلر گریز از مرکز است. $g_{i,t}^{aux}$ میزان نرخ سوخت گاز بویلر کمکی است، و COP نسبت بهره‌وری انرژی چیلر گریز از مرکز است.

۲-۶- مخزن ذخیره سازی

مخزن، آب سرد و گرم را در زمانی که استفاده نمی‌شوند، ذخیره می‌کند، بنابراین بیش‌ترین تضمین تأمین آنی تقاضا و بالانس سیستم خنک کننده/حرارت و بهبود کارایی انرژی CCHP را فراهم می‌کند. در حالت CCP، فرمول (۷) تعادل انرژی در مخزن را توصیف می‌کند، در حالی که در حالت CHP، فرمول (۸) استفاده می‌شود. فرمول (۹) تضمین می‌کند که انرژی ذخیره شده در مخزن در پایان روز برابر با مقدار اولیه است.

$$\boldsymbol{0 \le ES_{i,t} \le ES_i^{max}} \quad (۶)$$

$$\boldsymbol{ES_{i,t+1} = ES_{i,t} + Q_{i,t}^{cchp} \Delta t - E_{i,t}^{use}} \quad (۷)$$

$$\boldsymbol{ES_{i,t+1} = ES_{i,t} + h_{i,t}^{cchp} \Delta t - E_{i,t}^{use}} \quad (۸)$$

$$\boldsymbol{ES_{i,start} = ES_{i,end}} \quad (۹)$$

که $ES_{i,t}$ انرژی سرد / گرم ذخیره شده در مخزن است. $E_{i,t}^{use}$ انرژی خنک کننده / گرما مصرف شده توسط کاربر در آن زمان است. معادله اختلاف دما، تقاضای خنک کننده و حرارت را تعیین می‌کند:

$$\boldsymbol{T_{t+1}^{in} = \varepsilon T_t^{in} + (1-\varepsilon)\left(\frac{T_t^{out} \pm E_{i,t}^{use}}{A \Delta t}\right)} \quad (۱۰)$$

که T_t^{in} و T_t^{out} درجه حرارت داخلی و خارجی است. ε ضریب اینرسی دما است و A ضریب هدایت گرما است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- تابع هدف

این تحقیق با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی IES که شامل موارد زیر است: (۱) هزینه‌های خرید برق و گاز طبیعی، (۲) زیان‌های اقتصادی ناشی از بارهای از دست رفته (برق و گاز) ، (۳) هزینه شبکه اصلی که برای تنظیم نوسانات برق ناشی از RES کمک می‌کند و (۴) کاهش هزینه مربوط به انتشار CDE، بنابراین، تابع هدف به شرح زیر است:

$$\min \text{cost} = \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} P_{i,t}^{grid}\rho_{ele,t} + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} g_{i,t}^{total}\rho_{gas,t} + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} P_{i,t}^{cut}\rho_{elecut} + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} g_{i,t}^{cut}\rho_{gascut} + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} f_{i,t}^{cde}\rho_{cde,t} + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\in Ne} \Delta P_{i,t}^{grid}\rho_{res} \quad (۱۱)$$

$$\Delta P_{i,t}^{grid} = |P_{i,t}^{grid} - P_{i,t-1}^{grid}| \quad (۱۲)$$

که $P_{i,t}^{grid}$ تبادل توان اکتیو شبکه توزیع و شبکه اصلی است. $g_{i,t}^{total}$ مقدار کل گاز طبیعی تزریق شده به شبکه توزیع گاز است. $P_{i,t}^{cut}$ ، $g_{i,t}^{cut}$ به ترتیب تخلیه بار نیروی برق و کاهش گاز طبیعی است. $\Delta P_{i,t}^{grid}$ نوسان توان خط اصلی است. ρ_{ele}، ρ_{gas} بترتیب قیمت برق و قیمت گاز طبیعی است. $f_{i,t}^{cde}$ مقدار کل انتشار دی‌اکسید کربن و $\rho_{cde,t}$ قیمت انتشار می‌باشد. از آنجائی‌که IES شامل RES های متناوب است، اگر شبکه اصلی برای کمک به تنظیم نوسانات برق مورد نیاز باشد، ρ_{res} قیمت واحد تنظیم قدرت است که مربوط به ساختار شبکه اصلی یکپارچه و نفوذ RES در IES است. ρ_{elecut} ، ρ_{gascut} جریمه‌های اقتصادی تخلیه بار نیروی برق و محدود شدن گاز طبیعی است.

۳-۲- قیود شبکه برق

در IES با RES و چند CCHP، قیود مربوط به شبکه شامل فرمول ها (۱۲) - (۱۹)، جایی که $i \epsilon N_e, t \epsilon T$ می‌باشد. فرمول‌های (۱۲) و (۱۳) معادلات تعادل جریان قدرت هر گره است. با توجه به اینکه RES در IES یکپارچه شده است، هر دو دامنه و نرخ تغییر قدرت خط اصلی محدود است، همان‌طور که در فرمول‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. فرمول‌های (۱۶) و (۱۷) قید خروجی و قید حد بالا و پایین از MGTها در هر سیستم CCHP هستند. فرمول (۱۸) قید ولتاژ گره است. فرمول (۱۹) قید توان اکتیو خروجی RES است.

$$P_{i,t}^{grid} + P_{i,t}^{pgu} + P_{i,t}^{renew} - P_{i,t}^{load} - P_{i,t}^{ec} + P_{i,t}^{renewcut} = e_{i,t}\sum_{j\epsilon Ne}\left(G_{ij}e_{j,t} - B_{ij}f_{j,t}\right) + f_{i,t}\sum_{j\epsilon Ne}\left(G_{ij}f_{j,t} - B_{ij}e_{j,t}\right) \quad (۱۳)$$

$$q_{i,t}^{grid} + q_{i,t}^{pgu} + q_{i,t}^{renew} - q_{i,t}^{load} - q_{i,t}^{ec} = f_{i,t}\sum_{j\epsilon Ne}\left(G_{ij}e_{j,t} - B_{ij}f_{j,t}\right) - e_{i,t}\sum_{j\epsilon Ne}\left(G_{ij}f_{j,t} - B_{ij}e_{j,t}\right) \quad (۱۴)$$

$$(P_{i,t}^{grid})^2 + (q_{i,t}^{grid})^2 \le (S_i^{max})^2 \quad (۱۵)$$

$$|P_{i,t}^{grid} - P_{i,t-1}^{grid}| \le P_i^{grid,ramp} \quad (۱۶)$$

$$I_{i,t}P_i^{pgu,min} \le g_{i,t}^{pgu} \le I_{i,t}P_i^{pgu,max} \quad (۱۷)$$

$$|P_{i,t}^{pgu} - P_{i,t-1}^{pgu}| \le P_i^{pgu,ramp} \quad (۱۸)$$

$$(V_i^{min})^2 \le e_{i,t}^2 + f_{i,t}^2 \le (V_i^{max})^2 \quad (۱۹)$$

$$P_{i,t}^{renew} = P_{i,t}^{fore} - P_{i,t}^{renewcut} \quad (۲۰)$$

که در آن $P_i^{grid,ramp}$، بالاترین حد نوسان توان خط اصلی است. $q_{i,t}^{grid}$ تبادل توان راکتیو است. $P_{i,t}^{pgu}$، $q_{i,t}^{pgu}$ توان اکتیو و راکتیوMGT است. $P_{i,t}^{renew}$، $q_{i,t}^{renew}$ توان اکتیو و راکتیو RES است. $P_{i,t}^{load}$، $q_{i,t}^{load}$ بار اکتیو و راکتیو هر گره است. $I_{i,t}$، متغیر ۰-۱ است، که نشان دهنده وضعیت روشن / خاموش MGT است. $P_{i,t}^{fore}$ قدرت پیش‌بینی شده خروجی RES، و $P_{i,t}^{renewcut}$ کاهش قدرت RES است.

۳-۳- قیود شبکه گاز

محدودیت‌های شبکه توزیع گاز از روابط (۲۱) - (۲۴) تشکیل شده است، جایی که، $i\epsilon N_g, t\epsilon T$ می‌باشد. در این تحقیق مدل جریان گاز پایدار در مقیاس زمانی روز پیش‌رو زمان‌بندی شده است. معادله ویموث برای توصیف رابطه بین فشار گاز گره و جریان گاز شبکه در رابطه (۲۱) معرفی شده است، جایی که $g_{i,j,t}^{line}$ جریان گاز در خط لوله است. $P_{i,t}$، فشار گاز گره است. λ ضریب اصطکاک Darcy است که در این تحقیق ۰،۰۳۳ در نظر گرفته شده است. Z فاکتور فشرده‌سازی گاز است که به عنوان ۱ در شبکه توزیع گاز تنظیم شده است. Temp میانگین ضریب دما جریان گاز است که به عنوان ثابت فرض می‌شود. Δh تفاوت ارتفاع بین گره است. $D_{i,j}$ و $L_{i,j}$ به ترتیب قطر و طول خط لوله هستند. $S_{i,j}$، سطح مقطع خط لوله است. $C = 2g/ZRTemp$، جایی که g شتاب گرانشی است. تعادل جریان گاز گره توسط رابطه (۲۲) مدل-سازی شده است، که نشان می‌دهد که جریان کل گاز تزریق برابر با گاز خارج شده است. رابطه (۲۳) قید محدوده فشار هر گره است. رابطه

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

(۲۴) مصرف گاز هر سیستم CCHP را محاسبه می‌کند که ارتباط بین شبکه گاز و شبکه برق را ایجاد می‌کند.

$$(g_{i,j,t}^{line})^2 = \frac{1}{4}.\frac{|p_{i,t}^2(1-c\Delta h) - p_{j,t}^2|D_{i,j}.S_{i,j}}{(1-\frac{c\Delta h}{2})ZRL_{i,j}TEMP} \quad (۲۱)$$

$$\sum_{k\epsilon N_g} g_{i,j,t}^{line} - g_{i,t}^{load} - g_{i,t}^{pgu} - g_{i,t}^{aux} \quad (۲۲)$$

$$P_i^{min} \le P_{i,t} \le P_i^{max} \quad (۲۳)$$

$$g_{i,t}^{pgu} = f_{gas}^{-1}(p_{i,t}^{pgu}) \quad (۲٤)$$

که $g_{i,t}^{load}$ جریان گاز بار است. $g_{i,t}^{pgu}$ نرخ سوخت MGT در سیستم CCHP است. تابع $f_{gas}^{-1}(p_{i,t}^{pgu})$ رابطه بین توان خروجی و جریان گاز را توصیف می‌کند.

۴- شبیه سازی و نتایج عددی

روابط (۱)-(۲۴)، مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری هماهنگ سیستم توزیع انرژی یکپارچه را تشکیل می‌دهند. این مدل شامل بسیاری از اجزای غیرخطی است، علاوه بر محاسبه جریان برق AC و محاسبه جریان گاز در نظر گرفته شده برای عملیات هماهنگ مرسوم، اتصال چندگانه غیر خطی سیستم CCHP را نیز شامل می‌شود. در عین حال ترتیب روشن / خاموش شدن CCHPها مشخص نیست، بنابراین متغیر ۰-۱ متغیر $I_{i,t}$ معرفی می‌شود. بنابراین، این مدل به صورت ریاضی به عنوان یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP) طبقه-بندی شده است، که یکی از پیچیده‌ترین مسائل است. از آنجا که این تحقیق بر نوسانات توان تمرکز دارد، تعریف ریاضی، نوسانات متغیرها در لحظات مختلف نسبت به یکدیگر را تعریف می‌کند، بنابراین مدل از یک مسأله بهینه‌سازی استاتیک برای حل مستقل در هر زمان مشخص، به یک مسأله بهینه‌سازی پویا از اتصال چند بخش تبدیل می‌شود. تعداد متغیرها به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش تقسیم‌بندی در هر مقطع از زمان افزایش می‌یابد، که یک چالش بر کارایی محاسباتی و حافظه قرار می‌دهد. در بیش‌تر تحقیقات در دسترس، شبکه برق و شبکه گاز به صورت مستقل و تکرار متناوب محاسبه می‌شود. با این حال، ارتباط زمانی بین متغیرها، روند تکرارپذیری را پیچیده‌تر می‌کند و حل مسأله مشکل می‌شود.

برای پاسخ‌گویی به الزامات عملی دقت و سرعت حل، یک الگوریتم بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده است که مسأله اصلی را ساده می‌کند. در این تحقیق، متغیر $I_{i,t}$ on/off از MGT عامل مهمی برای حل مسأله است. در مرحله اول، خروجی MGT با فرض اینکه خروجی آن می‌تواند به طور پیوسته از ۰ به $P_i^{pgu,max}$ متغیر باشد، به پایین‌ترین حد کاهش می‌یابد. بر اساس کمی تخفیف، مدل فوق برای به دست آوردن نقطه عملیاتی مناسب $P_{i,t}^{pgu*}$ حل می‌شود. با این فرضیه، بهینه-سازی مرحله اول دیگر شامل متغیر ۰-۱ نیست، و مدل به یک مسأله برنامه‌نویسی غیرخطی (NLP) ساده شده است. الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مسأله NLP در بسیاری از تحقیقات معرفی شده‌اند، اما چنین الگوریتم‌هایی به تنظیم پارامتر اولیه حساس هستند و نمی‌توانند پایداری حل را تضمین کنند. در این مرحله نتایج محاسبات توان بدون در نظر گرفتن توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان نقطه اولیه تعیین می‌شود.

با توجه به نتایج مناسب پارامترهای MGT، می‌توان مشاهده کرد که مصرف گاز و توان خروجی دارای یک رابطه تابع درجه دوم هستند، و افزایش بهره‌وری تولید با افزایش تولید برق افزایش می‌یابد. همراه با نقطه عملیاتی ایده‌آل $P_{i,t}^{pgu*}$ از MGT که در مرحله اول به دست آمده است، یک استراتژی عملیاتی جدید برای اطمینان از کارایی و به صرفه بودن MGT ارائه شده است.

$$\forall\, k \in A_t, p_{k,t}^{pgu*} \le p_k^{pgu,min} \quad (۲۵)$$

$$\forall\, k_1, k_2 \in A_t, if\ k_1 < k_2, p_{A_{t(k_1),t}}^{pgu*} \ge, p_{A_{t(k_2),t}}^{pgu*} \quad (۲۶)$$

در مورد $A_t = \phi$ نشان می‌دهد که، $P_{i,t}^{pgu*}$ تمام واحدها در این زمان بالاتر از حداقل خروجی خود تولید می‌کنند و تمام واحدها در آن قرار دارند. در مورد $A_t \neq \phi$، به این معنی است که $P_{i,t}^{pgu*}$ در برخی از واحدها امکان‌پذیر نیست و وضعیت عملیاتی چنین واحدهایی بیشتر باید مشخص شود. هنگامی که تمام این واحدها خاموش می‌شوند، تعیین کنید که آیا کمبود توان را می‌توان به سایر واحدها اختصاص داد. اگر فرض برقرار باشد، تمام این واحدها در این لحظه خاموش می‌شوند. در غیر این صورت، آنها را با توجه به مرتبه $P_{i,t}^{pgu*}$ از بزرگ به کوچک تنظیم کنید. پس از اینکه وضعیت روشن/خاموش هر MGT مشخص شد، تمام متغیرهای مساله اصلی پیوسته هستند. در مرحله دوم، مدل بهینه‌سازی با وضعیت توربین‌های گاز تعیین شده یک مسأله NLP است. در مرحله دو، نقطه اولیه توسط نتایج مرحله اول تعیین می‌شود.

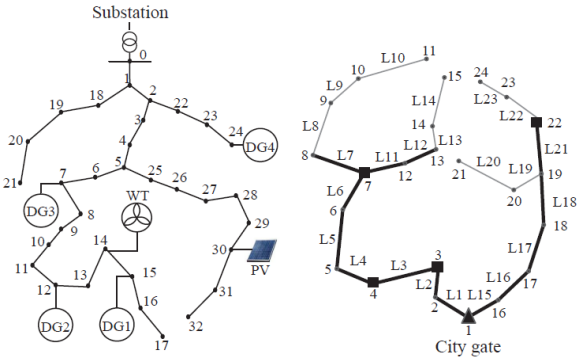
در شبیه‌سازی اقدام به در نظر گرفتن باتری در این سیستم گردید. همچنین در تابع هدف اقدام به در نظر گرفتن قیمت مربوط به انتشار CDE گرفته شد و در محاسبه هزینه‌های نهایی تنظیم شبکه لحاظ گردید. مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع قدرت IEEE 33 و شبکه گاز ۲۴ گره آزمایش شده است[۱۴]. در مدل شبکه قدرت، گره 0، slack bus است، $e_{0,t} = 12.66kV, f_{0,t} = 0$. چهار CCHP در گره‌های ۷، ۱۲، ۱۵، ۲۴ به ترتیب قرار دارند و یک مزرعه بادی و نیروگاه فتوولتائیک به ترتیب در گره‌های ۱۴ و ۳۰ متصل می‌شوند. ساختار شبکه گاز و توزیع بارهای گاز بر اساس روش برنامه‌ریزی شبکه گاز می-باشد. واحد بارهای گاز بر اساس مقدار کالری گاز طبیعی به MW تبدیل می‌شود. ظرفیت نصب شده از نیروگاه باد و نیروگاه فتوولتائیک هر دو ۰،۸ مگاوات است و ضریب قدرت ۰،۸۵ است. مسأله توسط نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی شده است.

طرح ۱: سیستم‌های گاز و برق به صورت کامل و یکپارچه برنامه‌ریزی شده‌اند. استراتژی بهره‌برداری هماهنگ پیشنهاد شده در این تحقیق

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

مورد استفاده قرار گرفته است و چهار سیستم CCHP هماهنگ عمل می‌کنند.

طرح ۲: استراتژی‌های بهره‌برداری کاربردی رایج شبکه توزیع برق و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، یعنی دو سیستم به طور مستقل برنامه‌ریزی شده‌اند. نحوه عملکرد CCHPها بر اساس قیمت برق بوده و حالت‌های شبکه برق و گاز را در نظر نمی‌گیرد. متغیرهای تصمیم‌گیری سیستم قدرت، سیستم گاز و CCHP در طرح ۱ با استفاده از مدل و الگوریتم پیشنهاد شده محاسبه می‌شود. در طرح ۲، حالت های عملکرد CCHP بر اساس قیمت برق، قیمت گاز و تقاضای مصرف کنندگان تعیین می‌شود. سپس توان تولید شده توسط CCHP و بار الکتریکی هر گره در مدل شبکه توزیع برق به منظور ارسال به سیستم قدرت وارد می‌شوند.

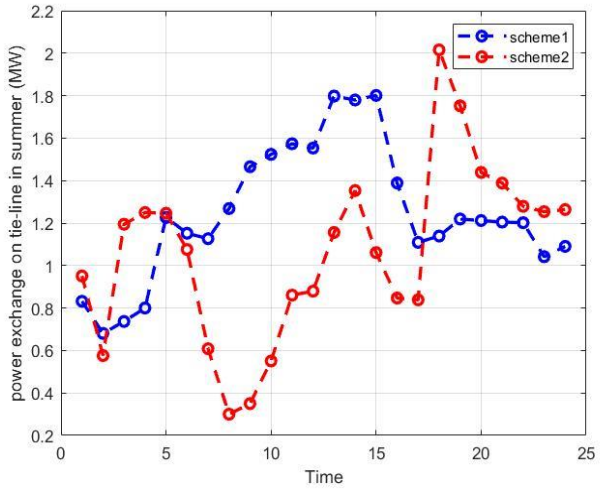


شکل (۱): شکل شماتیک شبکه برق و گاز مورد مطالعه[۱۴]

به منظور تائید این‌که روش پیشنهاد شده می‌تواند به طور موثر نوسانات توان خط اصلی را صاف کند، دو شرایط مختلف عملیاتی در شرایط تابستان و زمستان شبیه‌سازی می‌شوند:

- **مطالعه موردی در فصل تابستان**

تقاضای برق در تابستان با توجه به نیاز به تهویه مطبوع بیشتر از زمستان است، در حالی که بار گاز طبیعی در تابستان به علت کم بودن تقاضای گرما به‌طور چشم‌گیری کمتر از زمستان است. چهار CCHP همگی در حالت CCP راه‌اندازی می‌شوند. شکل ۳، مبادله توان در خط اصلی در طرح ۱ و طرح ۲ را مقایسه می‌کند. همان‌طور که از خط چین در طرح ۲ دیده می‌شود، از آنجا که نوسان برق تولیدی منابع تجدیدپذیر تزریق شده به شبکه توزیع، و توان خروجی CCHP مطابق با RES تنظیم نمی‌شود، نوسانات توان از طریق خط اصلی به شبکه اصلی منتقل می‌شود. در حالی‌که در طرح ۱، با توجه به استراتژی بهره‌برداری هماهنگ پیشنهاد شده، کمی نوسان به دیگر سیستم‌های محلی منتقل می‌شود و نوسانات توان در حد ثابتی نگه داشته می‌شود. در طرح ۲، مقدار توان تولید شده توسط توربین‌های گازی به طور عمده توسط قیمت انرژی و تقاضای خنک کننده تعیین می‌شود. از ساعت ۹:۰۰ تا ۲۱:۰۰ به علت افزایش قیمت برق، هزینه تولید برق MGT ها کمتر از خرید برق ازشبکه برق است، در نتیجه توربین‌های گاز حداکثر توان خروجی را در این دوره حفظ می‌کنند.



شکل(۲): نتایج تبادل توان خط فرا منطقه‌ای در تابستان

با این حال در طرح ۱، قدرت خروجی MGTها با توجه به نوسان برق تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر تنظیم می‌شود. از ۱۱:۰۰ تا ۱۲:۰۰، کل تولید برق منابع انرژی تجدیدپذیر در بالاترین سطح نگه داشته می‌شود، بنابراین توان خروجی میکروتوربین‌ها در این بازه نسبتا کم است. از ساعت ۱۵:۰۰ تا ۱۷:۰۰ خروجی فتوولتائیک فقط حدود ۰,۱۵ مگاوات است و قدرت باد به طور قابل توجهی نوسان می‌کند، به طوری که میکروتوربین‌ها بلافاصله به عدم تعادل توان واکنش نشان می‌دهد.

در طرح ۲، چهار سیستم CCHP مستقل عمل می‌کنند. در ساعت ۹ صبح، قیمت برق افزایش می‌یابد، تمام واحدها شروع به کار می‌کنند و افزایش توان با حداکثر سرعت صورت می‌پذیرد. افزایش توان ناگهانی MGT باعث کاهش چشم‌گیر مبادله توان با خط اصلی در این زمان می‌شود. در حالی‌که در ساعت ۲۱:۰۰، وقتی چهار توربین گاز هم‌زمان خاموش شدند، منجر به افزایش شدید توان در خط اصلی می‌شود، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است. در طرح ۱، از آنجا که چهار MGT هماهنگ عمل می‌کنند، زمان روشن و خاموش شدن ۴ واحد در بین ساعات ۹:۰۰ و ۲۱:۰۰ متفاوت است و توان تولیدی کل به تدریج افزایش یا کاهش می‌یابد، بنابراین مبادله توان با خط اصلی هموارتر می‌شود.

در طرح ۲، زمانی که MGT روشن می‌شود، میزان گاز در ساعت ۹:۰۰ به شدت تغییر می‌کند و در لحظات دیگر نیز صاف‌تر از آنچه در طرح ۱ است. نوسانات مصرف گاز در طرح ۱ به این دلیل است که ژنراتورهای با سوخت گاز، میزان سوخت را برای به تعادل رساندن نوسانات ناشی از تولید منابع انرژی تجدیدپذیر تغییر می‌دهند. بنابراین نوسان جزئی توان در شبکه توزیع برق به وسیله MGTها به سیستم گاز منتقل می‌شود. تغییرات ژنراتورهای با سوخت گاز موجب تغییر رفتار در درون شبکه توزیع گاز می‌شود. فشار گره در انتهای شبکه نقطه آسیب پذیر سیستم است. شایان بیان این‌که استراتژی پیشنهادی، نوسان فشار گاز را افزایش می‌دهد. با این حال، این افزایش عمدتا قابل تحمل است به این دلیل که مصرف گاز در تابستان کم است.

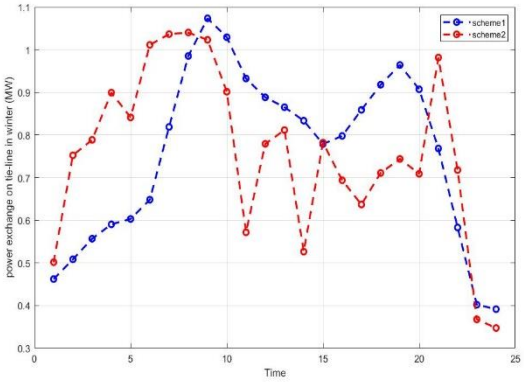
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

به منظور پاسخ‌گویی به نیازهای خنک کننده، چیلر جذبی، چیلر گریز از مرکز و مخزن ذخیره‌سازی آب با یک‌دیگر همکاری می‌کنند. از آنجا که قدرت خنک کنندگی چیلر جذبی به طور مستقیم توسط توان خروجی MGTها تعیین می‌شود، منحنی قدرت چیلر جذبی در طرح ۲ نرم‌تر از آنچه در طرح ۱ هست می‌باشد. هنگامی که قیمت برق پایین است، چیلر گریز از مرکز با استفاده از برق سرمایش ایجاد می‌کند. مخزن ذخیره‌سازی می‌تواند نوسانات تولید سرمایش که توسط خروجی‌های متفاوت چیلرها ایجاد شده را تثبیت کند، بنابراین تعادل عرضه و تقاضای سرمایش در هر دوره زمانی تضمین می‌شود.

- **مطالعه موردی در فصل زمستان**

تقاضا گاز در زمستان به علت نیاز گرمایش مسکونی به میزان قابل توجهی نسبت به تابستان افزایش می‌یابد. حداکثر بار گاز طبیعی در زمستان ۲,۷ برابر تابستان است و پیک تقاضای برق ۰,۷۵ برابر است. CCHP در زمستان در حالت CHP کار می‌کند. مبادله توان در خط اصلی در مورد زمستان در شکل ۴ نشان داده شده است، مبادله توان در طرح ۱ به وضوح صاف‌تر از طرح ۲ است و نوسان برق کمتر است. در ساعت ۵:۰۰ و ۱۲:۰۰، توان خروجی توربین گاز در طرح ۱ تا حدی به دلیل توان خروجی تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. در طول دوره ۰۷:۰۰ -۱۰:۰۰، توربین گاز به سرعت به نوسان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر واکنش نشان می‌دهد.

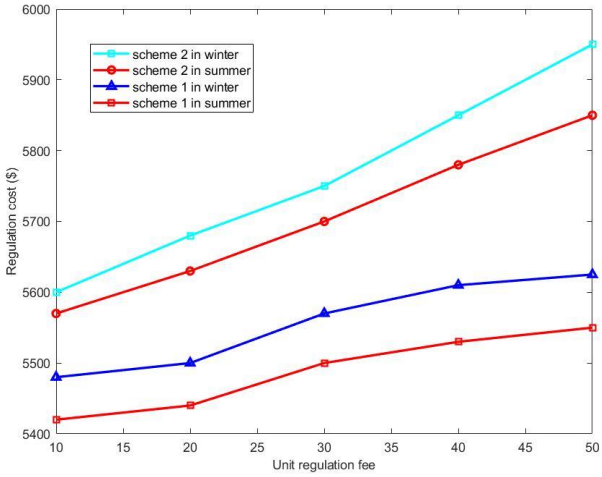
کل مصرف گاز طبیعی و تقاضای گاز خارج از تولید برق در زمستان بیشتر از تابستان است. از آنجا که جریان گاز در خطوط لوله افزایش می‌یابد، فشار گاز در انتهای شبکه در سطح پایین است (نزدیک به پایین‌ترین حد). در استراتژی عملیات مستقل (طرح ۲)، از آنجا که عملکرد CCHPها محدودیت‌های شبکه گاز را در نظر نمی‌گیرد، ارسال توان خروجی MGTها حتی زمانی که شبکه در سطح بحرانی باشد، ممکن است. در نتیجه، فشار گاز از ساعت ۱۹:۰۰ تا ۲۱:۰۰ از حد مجاز خارج می‌شود. در اغلب موارد، CCHPهای دارای قرارداد متوقف می‌شوند و این واحدها را به عنوان نامزدهای کاهش تقاضای گاز ترجیحی مورد استفاده قرار می‌دهند.



شکل (۳): نتایج تبادل توان خط فرا منطقه‌ای در زمستان

اپراتور با کاهش جزئی گاز تغذیه کننده CCHP برای اطمینان از پایداری شبکه توزیع گاز اقدام نموده، و این منجر به کمبود برق در سیستم برق می‌شود. در طرح ۱، با توجه به استراتژی بهره‌برداری هماهنگ، سیستم‌های مختلف هماهنگ با یکدیگر و در محدوده ایمنی عمل می‌کنند. هنگامی که فشار گاز در شبکه در سطح پایین است، نرخ سوخت توربین‌های گازی در طرح ۱ به طور قابل توجهی کمتر از طرح ۲ است.

نوسانات گاز مصرفی در شماتیک ۱ به واسطه‌ی این حقیقت است که ژنراتورهای گازی برای اینکه بتوانند نوسانات توان منابع انرژی تجدید پذیر را متعادل سازند، دائماً در حال تغییرند. هزینه تنظیم توان شبکه نه تنها مربوط به مقدار نوسانات توان خط اصلی، بلکه به توانایی تنظیم قدرت سیستم متصل شده نیز مربوط است. منبع این هزینه‌ها نیروگاه‌های برق حرارتی است که توان خروجی خود را تنظیم می‌کند تا تعادل موجود در تقاضا در زمان واقعی را تأمین کند. اصلاح مکرر توان در نیروگاه‌های برق موجب می‌شود رمپینگ و چرخه به دلیل هزینه‌های زیاد و محدودیت‌های رمپینگ، نیروگاه‌ها را در بارهای جزئی استارت کنند که باعث کاهش کارایی تولید توان می‌شود. با افزایش نفوذ RESهای توزیع شده، هزینه تنظیم به ترتیب افزایش می‌یابد. این تحقیق تأثیر هزینه تنظیم واحد در طرح ۱ و طرح ۲ را بررسی می‌کند. قیمت کلی تنظیم در طرح ۲ به سرعت با افزایش قیمت واحد افزایش می‌یابد. در حالی که در طرح ۱، هزینه تنظیم ثابت باقی می‌ماند و به آرامی افزایش می‌یابد. هنگامی که هزینه تنظیم واحد بالا است، مزیت اقتصادی طرح ۱ بیشتر نمایان می‌شود همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل(۴): هزینه تنظیمات تحت قیمت‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع، نوسانات خطی ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر دارای تولید نوسان‌دار، تأثیرات مخربی بر امنیت و قابلیت اطمینان شبکه اصلی ایجاد می‌کند. به همین منظور در این تحقیق یک روش کارآمد ارائه گردید تا علاوه بر جلوگیری از انتقال

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

نوسانات توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر به خط فرامنطقه‌ای، استفاده حداکثری از منابع انرژی تجدید پذیر صورت گیرد.

در مقایسه با مرجع [۱۴] ، در این مقاله شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار GAMS صورت گرفته و برای سیستم IES مورد مطالعه منبع ذخیره-ساز انرژی به‌صورت باتری نیز لحاظ گردید. همچنین در این تحقیق میزان انتشار آلودگی CDE و هزینه آن محاسبه و در هزینه کلی سیستم لحاظ گردیده است. شایان بیان این‌که این تحقیق تأثیر هزینه تنظیم واحد در طرح پیشنهادی (طرح ۱) و طرح مرسوم (طرح ۲) را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که قیمت کلی تنظیم در طرح مرسوم به سرعت با افزایش قیمت واحد افزایش می‌یابد. در حالی که در طرح ۱، هزینه تنظیم پایدار باقی می‌ماند و به آرامی افزایش می‌یابد. هنگامی که هزینه تنظیم واحد بالا است، مزیت اقتصادی طرح پیشنهادی بیشتر نمایان می‌شود. شایان بیان اینکه با توجه به افزایش نفوذ منابع تولید توان از منابع انرژی تجدیدپذیر، مزایای اقتصادی طرح پیشنهادی بیشتر نمایان خواهد شد. مطالعات بیشتر برای سیستم‌های هیبریدی-خورشیدی با منابع انرژی برای دست‌یابی به سطوح بالاتر درجه حرارت و انرژی و نیز کارهای بیشتری برای بررسی عملکرد کلکتورهای خورشیدی در مقیاس بزرگ باید انجام شود. مطالعات بیشتر برای افزایش بهره‌وری چیلرها توسط سازندگان صورت گیرد تا با کمترین میزان استفاده از گرما، تولید هوای سرد صورت گیرد و این امر موجب کاهش مصرف انرژی و به تبع آن کاهش آلایندگی خواهد شد، همچنین استفاده از سیستم CCHP در صنایع بزرگ مانند صنایع خودروسازی و نیز استفاده از این طرح در شبکه اصلی برق ایران و استفاده از باتری‌های با ظرفیت بالا در سیستم IES موجب افزایش بهره‌وری خواهد شد. استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی بویژه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری جهت شبیه‌سازی روش پیشنهادی بعنوان یک پیشنهاد برای ادامه این تحقیق قابل ارائه است.

مراجع

[1] A. Kasaeian, G .Nouri, P .Ranjbaran and D .Wen, *"Solar collectors and photovoltaics as combined heat and power systems: A critical review"*, Energy Conversion and Management, vol. 156, pp.688-705, 2018.

[2] J. Assaf and B. Shabani, *"Multi-objective sizing optimisation of a solar thermal system integrated with a solar-hydrogen combined heat and power system, using genetic algorithm"*, Energy Conversion and Management, vol. 164, pp. 518-532, 2018.

[3] J. Yu, L. Guo, M. Ma, S. Kamel, W. Li and X. Song, *"Risk assessment of integrated electrical, natural gas and district heating systems considering solar thermal CHP plants and electric boilers"*, Electrical Power and Energy Systems, vol.103, pp.307-316, 2018.

[4] L. Urbanucci and D. Testi, *"Optimal integrated sizing and operation of a CHP system with Monte Carlo risk analysis for long-term uncertainty in energy demands"*, Energy Conversion and Management, vol.157, pp.307-316, 2018.

[5] G. M. Kopanos, O. C. Murele, J. Silvente, N. Zhakiyev, Y. Akhmetbekov and D. Tutkushev, *"Efficient planning of energy production and maintenance of large-scale combined heat and power plants"*, Energy Conversion and Management, vol.169, pp. 390-403, 2018.

[6] Manijeh Alipour, Kazem Zare, Heresh Seyedi. A multi follower Bi-level stochastic programming approach for energy management of combined heat and power micro-grids. Energy 2018.

[7] A. Nouri , H. Khodaei , A. Darvishan , S. Sharifian , N. Ghadimi, *"Optimal performance of fuel cell-CHP-battery based micro-grid under real-time energy management"*, An epsilon constraint method and fuzzy satisfying approach, vol. 159, pp.121-133, 2018.

[8] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, G.B. Gharehpetian, *"A comprehensive review of heuristic optimization algorithms for optimal combined heat and power dispatch from economic and environmental perspectives"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

[9] S. Soheyli, M. Hossein Shafiei Mayam, M. Mehrjoo, *"Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC-MOPSO algorithm"*, Applied Energy, vol. 184, pp.375-395, 2016.

[10] M. Li, H. Mu, N. Li, Baoyu Ma, *"Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP system"*, vol. 99, pp. 202-220, Energy 2016.

[11] R. Zeng, H. Li, R. Jiang, L. Liu, G. Zhang, *"A novel multi-objective optimization method for CCHP–GSHP coupling systems"*, Energy and Buildings, vol. 112, pp. 149-158, 2016.

[12] X. Wang, C. Yang, M. Huang, X. Ma, *"Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system"*, Energy Conversion and Management, vol. 164, pp. 93-101, 2018.

[13] S. Faridoddin Afzali, V. Mahalec, "Novel performance curves to determine optimal operation of CCHP systems", Applied Energy, vol. 226, pp. 1009-1036, 2018.

[14] Y. Jiang, J. Xu, Y. Sun, C. Wei, J. Wang, S. Liao, D. Ke, X. Li, J. Yang and X. Peng, *"Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution system with multi-CCHP and distributed renewable energy sources"*. Applied Energy, vol.211, pp.237-248, 2018.

رزومه



سامدین انصاری در سال ۱۳۵۹ متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد واحد یادگار امام(ره) سپری کرده است. علاقه‌مندی و فعالیتهای ایشان در زمینه های بهره برداری از سیستمهای قدرت، بهره برداری سیستمهای CHP و است. و در حال حاضر مسئول تعمیرات شرکت ایران‌خودرو می‌باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



محمد تبریزیان در سال ۱۳۴۹ متولد شده است، تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۷۷) و دکترای مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۹) سپری کرده است، فعالیت پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده و بازار برق، برنامه‌ریزی و مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی، مهندسی انرژی و مدیریت انرژی است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) شهرری می‌باشد، از نامبرده تاکنون حدود سی و پنج مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.



حمیدرضا شاهمیرزاد در تهران متولد شده است(۱۳۶۴). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) (۱۳۹۸) سپری کرده است و هم اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) می‌باشد. علاقه‌مندی و فعالیتهای ایشان در زمینه های بهینه سازی و مدیریت انرژی، بازار برق، اینترنت اشیاء، طراحی، تامین و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی پلنتهای صنعتی، بومی سازی تجهیزات خاص الکتریکی صنایع مادر تخصصی است و در حال حاضر کارمند شرکت بین المللی مهندسی ایران(ایریتک) از زیرمجموعه های وزارت صمت می‌باشد. از نامبرده بیش از پانزده مقاله در مجلات و کنفرانسهای معتبر داخلی منتشر شده است.

زیرنویس ها

1 Combined Heating and power
2 solar-hydrogen combined heat and power system integrated with solar-thermal collectors
3 Integrated electrical, natural gas and district heating
4 solar thermal CHP
5 micro-grid
6 real-time
7 Autoregressive moving average
8 Combined heat and power economic dispatch
9 solid oxide fuel cells
10 compressed air energy storage system
11 distributed energy system
12 CCHP system combined with solar and compressed air energy storage
13 novel performance curves
14 integrated energy system
15 micro-gas turbine

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution network with CCHP and renewable energy sources

Samedin Ansari Ardeh[1], Mohammad Tabrizian[2], Hamidreza Shahmirzad[3]

1- Master of electrical engineering, IKCO, Tehran, Iran
2- Asistant Professor, Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3- Master of electrical engineering, Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: This article, proposed a method to coordinated utilization of gas-electricity integrated distribution system, including CCHP systems and renewable energy sources, considering AC load flow analysis in an electric grid and the calculation of gas consumption in a gas grid. In this research as you will see, an effective method proposed to prevent transmitting of power generation swings of renewable sources over trans-regional power line and maximum utilization of renewable sources. The proposed model tested on a modified distribution power grid IEEE 33 and 24-node-gas grid. Results show that total expense of adjustment in Conventional design will rise dramatically by increasing of unit. While in the presented design, adjustment expense will remain stable and increase slightly.

Keywords: Combined cooling heating and power system, Distributed generation, Renewable energy sources, Gas network

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022