

## بررسی احتمالاتی اثر حضور مبدل برق به گاز در مدیریت انرژی هاب‌های شبکه‌ای

وحید پاکدل<sup>۱</sup>، دانشجو، ابراهیم بابائی<sup>۲</sup>، استاد، بهنام محمدی ایواتلو<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز - ایران  
m.j.vahidpakdel94@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز - ایران  
e-babaei@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز - ایران  
bmohammadi@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** ایده هاب های انرژی باعث ایجاد فرصت های جدیدی در حوزه مدیریت انرژی شده است. از سوی دیگر حضور گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر باعث چالشی بزرگ در مباحث مدیریت و برنامه ریزی انرژی شده است. خروجی احتمالاتی و تصادفی این منابع در مناطقی که سهم این منابع در الگوی تامین انرژی چشمگیر باشد، باعث پیچیده شدن برنامه ریزی تامین تقاضای انرژی می گردد. ذخیره کننده های انرژی به عنوان راه حلی برای این موضوع بیان می شوند. یکی از این ذخیره کننده های انرژی الکتریکی، سیستم مبدل برق به گاز است که امکان ذخیره برق در شبکه گاز طبیعی را فراهم می آورد. این مقاله به بهینه سازی احتمالی هاب های شبکه ای در حضور سیستم مبدل برق به گاز و منابع تجدید پذیر با هدف اقتصادی پرداخته است. در این مقاله مبدل برق به گاز با امکان تزریق مستقیم هیدروژن به شبکه و وجود تانک هیدروژنی مدل شده است. این مقاله نشان می دهد که حضور مبدل برق به گاز می تواند میزان هزینه انرژی شبکه هاب ها و میزان قطع منابع تجدید پذیر را به صورت قابل ملاحظه ای کاهش دهد.

**واژه های کلیدی:** هاب انرژی، مدیریت انرژی، برنامه ریزی احتمالی، مبدل برق به گاز، منابع تجدید پذیر

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۳/۵

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر ابراهیم بابائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-دانشگاه تبریز-تبریز-ایران

## توضیح پارامترها و متغیرها

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ایده هاب‌های انرژی، باعث بوجود آمدن پتانسیل‌های جدیدی در زمینه مدیریت انرژی شده است. این ایده که برای اولین بار توسط [۱] مطرح گشت، با دیدگاه ترکیبی به حامل‌های مختلف انرژی و با استفاده از تکنولوژی‌های تبدیل انرژی همانند سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت<sup>۱</sup> (CHP) و کوره‌های برقی و گازسوز، باعث افزایش انعطاف‌پذیری استراتژی‌های مدیریت انرژی بهینه شده است. در بستر هاب انرژی، برای تامین بارهای مختلف انرژی، مسیرهای متفاوتی وجود دارد که بحث بهینه‌سازی را ممکن می‌سازد. بهینه‌سازی هاب‌های انرژی با هدف‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. اهدافی همچون بهره‌برداری اقتصادی [۲] یا کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی [۳]. امروزه بحث بهینه‌سازی هاب‌های انرژی، به سمت بهینه‌سازی شبکه‌ای از هاب‌های انرژی با امکان تبادل انرژی بین یکدیگر، پیش رفته است [۴]. تمامی این بررسی‌ها در راستای استفاده حداکثری از قابلیت‌های هاب‌های انرژی صورت می‌پذیرد.

از سوی دیگر، با افزایش بحران انرژی موجود در جهان و مشکلات زیست محیطی قابل توجه تامین انرژی با استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث توجه گسترده کشورها به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. با شناخته شدن بیشتر مزایای این منابع تامین انرژی، سهم این منابع در تامین انرژی مورد تقاضا، در دهه‌های اخیر به صورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است.

تغییر ذکر شده در الگوی تامین انرژی الکتریکی، محققان را بر آن داشته است تا بحث هاب‌های انرژی و بهینه‌سازی‌های مطرح‌شده در این حوزه را در حضور منابع تجدیدپذیر مطرح سازند. لحاظ کرد این منابع به همراه ویژگی‌های خاص بهره‌بردار آنها، منجر به ارائه استراتژی‌های مدیریت انرژی متفاوتی در حوزه هاب‌های انرژی شده است [۵].

با وجود مزایای فراوان تجدیدپذیر از جمله کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش وابستگی انرژی کشورها... حضور گسترده این منابع، مشکلات فنی را نیز برای شبکه‌های انرژی به همراه داشته است. عمده مشکل ایجاد شده توسط منابع تجدیدپذیر همچون توربین‌های بادی یا فتوولتائیک‌ها، ناشی از عدم قطعیت توان تولید شده توسط این منابع است. به دلیل وابسته بودن انرژی تولید شده منابع تجدیدپذیر به شرایط آب و هوایی، این منابع باعث به وجود آمدن مشکلات برنامه‌ریزی تامین انرژی می‌شوند [۶]. به عبارت دیگر، خروجی شدیداً متغیر این نیروگاه‌ها، باعث نقض قید حیاتی تعادل توان تولیدی و مصرفی شده و منجر به کمبود یا ازدیاد توان تولید شده می‌گردد. البته بدیهی است که تمامی این مشکلات مطرح شده، در سیستم‌های انرژی رخ می‌دهد که منابع انرژی تجدیدپذیر سهم چشمگیری از تامین انرژی را بر عهده داشته باشند و گرنه در شبکه‌هایی که ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر ناچیز است، طرح چنین مشکلاتی تقریباً بی‌معنا خواهد بود. از سوی دیگر، خروجی تصادفی این نیروگاه‌ها، باعث عدم استفاده حداکثری از ظرفیت اقتصادی آنها می‌شود. قطع

پارامتر یا متغیر	توضیحات
$t$	نشانه زمان
$s, S$	نشانه سناریو، تعداد سناریو
$k$	نشانه هاب
$\Omega_s$	احتمال هر سناریو
$P_g, P_e$	انرژی ورودی از شبکه برق و گاز
$\pi_e, \pi_g$	قیمت برق و گاز
$P_e^k, P_h^k$	تقاضای انرژی الکتریکی و گرمایی هاب
$P_{CHP}^k, P_{Tran}^k, P_{Boil}^k$	توان مصرفی CHP، ترانس و بویلر
$\eta_{CHP}^{ge}, \eta_{CHP}^{gh}$	بازده گاز به برق و گاز به گرما CHP
$\eta_{Boil}^{gh}, \eta_{Tran}^{ee}$	بازده بویلر و ترانس
$P_{in}^h, P_{out}^h, P_{in}^e, P_{out}^e$	توان گرمایی و الکتریکی خارج شده / وارد شده از هاب به/از هاب های دیگر
$P_{CHP}^{min}, P_{CHP}^{max}$	مینیمم و ماکزیمم توان CHP
$P_{Boil}^{min}, P_{Boil}^{max}$	مینیمم و ماکزیمم توان بویلر
$P_{Tran}^{min}, P_{Tran}^{max}$	مینیمم و ماکزیمم توان ترانس
$P_{e,h}^{ij}, P_{h,e}^{ij}$	توان انتقالی الکتریکی و گرمایی از هاب i به هاب j
$P_{e,ij}^{max}, P_{h,ij}^{max}$	ماکزیمم توان انتقالی الکتریکی و گرمایی از هاب i به هاب j
$v$	سرعت باد
$v^{in}, v^{rated}, v^{out}$	سرعت های سه گانه مشخصه توربین بادی
$P_{rated}^W$	مقدار نامی تولید الکتریکی توربین بادی
$P_e^W, P_{curt}^W$	میزان توان تولیدی توربین بادی و میزان قطع تولید
$P_e^{p2g}$	میزان برق ورودی الکترولایزر
$P_e^{p2g,min}, P_e^{p2g,max}$	مینیمم و ماکزیمم برق ورودی الکترولایزر
$P^{H_2}, P_G^{p2g}$	میزان هیدروژن تولیدی الکترولایزر و گاز تولیدی فرآیند متان سازی
$\eta_{Electro}, \eta_{Methani}$	بازده الکترولایزر و متان سازی
$P_{Direct}^{H_2}, P_{Methani}^{H_2}$	میزان هیدروژن تزریق مستقیم و ورودی متان سازی
$P_{Tank-ch}^{H_2}, P_{Tank-dis}^{H_2}$	شارژ و دشارژ تانک هیدروژنی
$\eta_{ch}, \eta_{dis}$	بازده شارژ و دشارژ تانک هیدروژنی
$P_{Tank}^{H_2}, P_{Tank}^{H_2, capa}$	سطح انرژی تانک هیدروژنی و ظرفیت تانک
$\beta^{min}, \beta^{max}$	ضرایب مینیمم و ماکزیمم میزان انرژی تانک
$\alpha^{min}, \alpha^{max}$	ضرایب مینیمم و ماکزیمم میزان انرژی شارژ و دشارژ
$\varepsilon$	حد بالای میزان تزریق مستقیم هیدروژن

حضور این نوع ذخیره‌ساز باعث کویل شدن هر چه بیشتر حامل‌های مختلف انرژی به یکدیگر می‌گردد و بحث بهینه‌سازی اقتصادی شبکه هاب‌ها را پیچیده‌تر می‌سازد زیرا که با امکان تبدیل انرژی الکتریکی به گاز، چرخه تبدیل صورت‌های مختلف انرژی در هاب کامل شده و متغیرهای کنترلی جدیدی به مساله اضافه می‌گردد. البته شایان به ذکر است که اضافه شدن این متغیرهای کنترلی وضعیت مدیریت انرژی را بهبود می‌بخشد.

بهینه‌سازی هاب انرژی یا شبکه‌ای از هاب‌های انرژی در حضور سیستم مبدل برق به گاز در مراجع با اهداف متنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۶] بهینه‌سازی شبکه‌ای از هاب‌ها را با تابع هدف کمینه کردن هزینه بهره‌برداری انجام داده است. در این مرجع، هیدروژن به عنوان یکی از صورت‌های انرژی مورد تقاضای مشتریان در نظر گرفته شده است که بهره‌بردار سیستم ملزم به تامین آن است. بررسی اقتصادی سیستم مبدل برق به گاز در قالب ایده هاب انرژی در مرجع [۱۷] مورد توجه قرار گرفته است. مرجع [۱۸] بهینه‌سازی همزمان سیستم مبدل برق به گاز در کنار نیروگاه سیکل ترکیبی را قالب ایده هاب انرژی ارائه داده است. بحث کنترل تغییرات تولید منابع تجدیدپذیر و غلبه بر ویژگی کنترل ناپذیری این منابع در مرجع [۱۹] مورد بررسی قرار گرفته است و ترکیب توربین گازی و سیستم مبدل گازی جهت حل مشکل مذکور مورد پیشنهاد قرار گرفته است.

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، خاصیت تصادفی بودن و عدم قطعیت خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر یک از ویژگی‌های جدایی‌ناپذیر این منابع می‌باشد. در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها در مدلسازی، با استفاده از روش‌های بررسی احتمالاتی می‌تواند به واقعی‌تر کردن مدل ارائه شده کمک شایانی کند. بهینه‌سازی احتمالاتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم شامل خروجی منابع تجدیدپذیر و بارهای مورد تقاضا در هاب‌ها باعث انعطاف‌پذیری مدل ارائه شده در مقابل عدم قطعیت‌های موجود می‌گردد.

از سوی دیگر، در بسیاری از کارهای انجام شده در حوزه مبدل‌های برق به گاز، این سیستم به صورت کامل مورد مدلسازی قرار نگرفته است. امکان تزریق مستقیم هیدروژن و امکان ذخیره‌سازی هیدروژن در تانک هیدروژن از جمله امکاناتی هستند که در بسیاری از کارها مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

مقاله حاضر، به بررسی احتمالاتی مدیریت انرژی شبکه هاب‌ها با در لحاظ‌کردن منبع تولید بادی و سیستم مبدل برق به گاز به عنوان سیستم ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی پرداخته است. در این مقاله سیستم مبدل برق به گاز به صورت کامل و با امکان ذخیره هیدروژن در تانک هیدروژن، تزریق مستقیم هیدروژن به شبکه گازی و متان سازی مورد مدلسازی شده است. یک شبکه چهار هابه به عنوان تست سیستم مورد بررسی قرار گرفته و مدل MILP ارائه شده توسط نرم‌افزار قدرتمند بهینه‌سازی GAMS حل شده است.

تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر یا کاهش میزان سهم این نیروگاه‌ها در تامین انرژی که به تبع اضافه تولید موجود در شبکه، یا مشکلات ازدحام خطوط انتقال رخ می‌دهد، میزان بهره‌وری اقتصادی این نیروگاه‌ها را کاهش می‌دهد [۷].

یکی از راهکارهای مطرح شده برای استفاده حداکثری از انرژی تولید شده توسط نیروگاه‌های تجدیدپذیر استفاده از سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی است [۸]. استراتژی کلی این سیستم‌ها - در عین تنوع زیاد آن‌ها - به این گونه است، که اضافه تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر توسط آن‌ها به صورت نوع دیگری انرژی (شیمیایی، هوای فشرده، نمک مذاب و ...) ذخیره می‌گردد و در زمان مقتضی دوباره به صورت انرژی الکتریکی در آمده و به شبکه تزریق می‌شود. استفاده سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، علاوه بر کمک به حل مشکل خروجی متغیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌تواند باعث کاهش هزینه بهره‌برداری شبکه قدرت [۹]، حل مشکلات ازدحام خطوط [۱۰] و تنظیم ولتاژ [۱۱] نیز شود.

سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی دارای انواع مختلفی هستند. یکی از انواع سیستم‌های ذخیره کننده انرژی الکتریکی که هم از لحاظ علمی و هم از لحاظ عملی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، سیستم مبدل برق به گاز می‌باشد. فرآیند تبدیل برق به گاز در این مبدل‌ها که توسط فعل و انفعالات شیمیایی صورت می‌پذیرد، باعث تولید هیدروژن یا گاز طبیعی (متان) با استفاده از انرژی الکتریکی می‌گردد [۱۲].

در سیستم مبدل برق به گاز ابتدا الکترولایز با مصرف انرژی الکتریکی آب تزریقی را تجزیه کرده و به هیدروژن تبدیل می‌کند. هیدروژن حاصل از تجزیه الکترولایز هم قابلیت ذخیره‌سازی در تانک‌های هیدروژنی را دارد، و هم می‌تواند به عنوان ورودی پروسه متان‌سازی مورد استفاده قرار بگیرد. در فرآیند متان سازی، هیدروژن ورودی با گاز دی‌اکسیدکربن ترکیب می‌گردد و متان تولید می‌کند [۱۳].

سیستم مبدل برق به گاز، امکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شبکه گازی را فراهم می‌آورد. این امکان به صورت تزریق متان تولید شده توسط سیستم به شبکه، یا تزریق مستقیم هیدروژن تولیدی الکترولایز به شبکه گازی ترتیب می‌پذیرد. البته تزریق هیدروژن به شبکه گازی به دلیل تغییر ترکیب گازی درون لوله‌های شبکه دارای محدودیت‌هایی است که در مرجع [۱۴] مورد بحث قرار گرفته است. هیدروژن تولید شده توسط الکترولایز علاوه بر امکان تزریق به شبکه گازی می‌تواند با استفاده از تکنولوژی پیل‌های سوختی به بازتولید انرژی الکتریکی منجر گردد که در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است. دو ویژگی مهمی که سیستم مبدل برق به گاز را به عنوان ذخیره‌کننده‌ای مناسب برای انرژی الکتریکی مطرح می‌سازد عبارتند از: ۱) نرخ تغییرات شارژ و تخلیه‌ی بسیار سریع که قابلیت پاسخگویی به تغییرات سریع تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌کند. ۲) استفاده از شبکه گازی برای ذخیره انرژی الکتریکی که قابلیت ذخیره انرژی در مقیاس بزرگ را دارد [۱۵].

$$OF = \text{Min} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{24} \Omega_s (P_g(t,s)\pi_g(s) + P_e(t,s)\pi_e(t,s)) \quad (1)$$

که در عبارت بالا هزینه بهره برداری سیستم برابر هزینه توان الکتریکی ورودی به اضافه هزینه گاز ورودی به سیستم در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه زمان بهره برداری به صورت روزانه در نظر گرفته شده است و قیمت گاز در طی روز تغییر نمی کند، بنابراین قیمت گاز به صرفا به صورت تابعی از سناریو، ولی قیمت برق به صورت تابعی از زمان و سناریو بیان شده است.

### ۲-۲-۳- قیود مساله

مساله بهینه سازی مذکور دارای قیودی است که باید مورد توجه قرار گیرند. قیود مزبور به صورت زیر قابل طرح هستند:

#### ۳-۲-۱- تامین تقاضا انرژی

میزان تولید انرژی در هر هاب باید به گونه ای باشد که انرژی مورد تقاضا هاب را تامین نماید. به عبارت دیگر میزان انرژی ورودی به هاب در هر صورت انرژی، باید برابر مصرف باشد. معادلات زیر عبارت فوق را در هر هاب برقرار می سازند:

$$P_e^k(t,s) = P_{CHP}^k(t,s)\eta_{CHP}^{ge} + P_{Tran}^k(t,s)\eta_{Tran}^{ee} + P_{in}^e - P_{out}^e \quad (2)$$

$$P_h^k(t,s) \leq P_{CHP}^k(t,s)\eta_{CHP}^{gh} + P_{Boil}^k(t,s)\eta_{Boil}^{gh} + P_{in}^h - P_{out}^h \quad (3)$$

معادلات (۲) و (۳) قید لزومی تامین تقاضا برای انرژی های الکتریکی و گرمایی را در هر هاب بیان می دارند. البته قابل به ذکر است که به دلایل فنی امکان هدررفت و تلف، انرژی گرمایی تولید شده می تواند بیشتر از میزان تقاضا نیز باشد. به عبارت دیگر، میزان گرمای تولید شده نباید کمتر از بار گرمایی هاب باشد.

#### ۳-۲-۲- قیود فنی تجهیزات

تجهیزات داخل هاب باید در محدوده مجاز خود مورد بهره برداری قرار بگیرند. این قیود فنی برای تجهیزات در معادلات زیر نوشته شده است:

$$P_{CHP}^{\min} \leq P_{CHP}^k(t,s) \leq P_{CHP}^{\max} \quad (4)$$

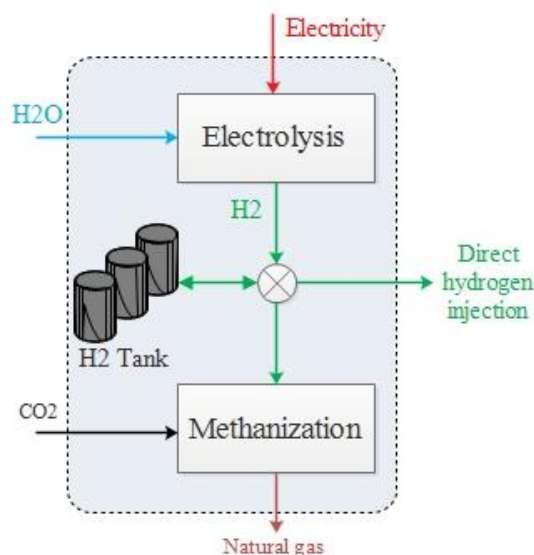
$$P_{Boil}^{\min} \leq P_{Boil}^k(t,s) \leq P_{Boil}^{\max} \quad (5)$$

$$P_{Tran}^{\min} \leq P_{Tran}^k(t,s) \leq P_{Tran}^{\max} \quad (6)$$

ادامه مقاله به صورت زیر مرتب گشته است:  
بخش ۲ به بررسی اجمالی سیستم مبدل برق به گاز پرداخته است. بخش ۳ فرمولاسیون بهینه سازی احتمالاتی مورد نظر را شرح داده است. بخش ۴ به معرفی تست سیستم مورد شبیه سازی پرداخت کرده و نتایج این شبیه سازی ها در بخش ۵ ارائه شده است. نهایتا بخش ۶ به نتیجه گیری مقاله اختصاص داده شده است.

### ۲- سیستم مبدل برق به گاز

مجموعه ی سیستم مبدل برق به گاز با مصرف انرژی الکتریکی و طی فعل و انفعالات شیمیایی به تولید هیدروژن و متان می پردازد. این سیستم که می تواند به عنوان ذخیره سازی انرژی الکتریکی مورد توجه و استفاده قرار بگیرد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. کلیات سیستم مبدل برق به گاز

همانطور که در شکل قابل ملاحظه است، ابتدا آب ورودی به الکترولیز با استفاده از انرژی الکتریکی تجزیه می شود و هیدروژن حاصل می گردد. هیدروژن تولیدی هم می تواند در تانک هیدروژنی ذخیره گردد تا در موقع لزوم دوباره مورد استفاده قرار بگیرد، هم می تواند با توجه به محدودیت هیدروژن موجود در شبکه گازی، به شبکه تزریق شود و هم قابلیت تبدیل به متان را خواهد داشت.

### ۳- مدلسازی ریاضی مساله

مدلسازی اتقافی<sup>۲</sup> بهینه سازی شبکه ای از هابها با در نظر گرفتن سیستم مبدل برق به گاز به صورت زیر قابل ارائه است.

#### ۳-۱- تابع هدف

هدف بهینه سازی مورد نظر، کمینه کردن هزینه بهره برداری کل سیستم است. بنابراین تابع هدف می تواند به صورت زیر نوشته شود:

معادلات (۴)-(۶) بیانگر محدودیت های بهره برداری تجهیزات درون هاب هستند.

$$P_e^{p2g}(t, s) = P^{H_2}(t, s) \times \eta_{Electro} \quad (11)$$

$$P_G^{p2g}(t, s) = P_{Methani}^{H_2}(t, s) \times \eta_{Methani} \quad (12)$$

$$P^{H_2}(t, s) = P_{Direct}^{H_2}(t, s) + P_{Methani}^{H_2}(t, s) + P_{Tank-ch}^{H_2}(t, s) - P_{Tank-dis}^{H_2}(t, s) \quad (13)$$

معادله (۱۱) نشانگر تعادل توان در ورودی-خروجی الکترولايز است. معادله (۱۲) تعادل توان فرآیند متان سازی را بیان می کند و نهایتا معادله (۱۳) قانون بقای انرژی هیدروژن تولید شده توسط الکترولايز را برقرار می سازد.

معادلات تانک هیدروژن که به صورت یک ذخیره ساز پیاده سازی می گردد به صورت روابط (۱۴) تا (۱۷) نوشته می شود.

$$P_{Tank}^{H_2}(t, s) = P_{Tank}^{H_2}(t-1, s) + (P_{Tank-ch}^{H_2}(t, s) \times \eta_{ch}) - (P_{Tank-dis}^{H_2}(t, s) / \eta_{dis}) \quad (14)$$

$$\beta^{\min} P_{Tank}^{H_2, capa} \leq P_{Tank}^{H_2}(t, s) \leq \beta^{\max} P_{Tank}^{H_2, capa} \quad (15)$$

$$\alpha^{\min} P_{Tank}^{H_2, capa} \eta_{ch} \leq P_{Tank-ch}^{H_2}(t, s) \leq \alpha^{\max} P_{Tank}^{H_2, capa} \eta_{ch} \quad (16)$$

$$\alpha^{\min} P_{Tank}^{H_2, capa} (1 / \eta_{dis}) \leq P_{Tank-dis}^{H_2}(t, s) \leq \alpha^{\max} P_{Tank}^{H_2, capa} (1 / \eta_{dis}) \quad (17)$$

معادله (۱۴) بیانگر قانون بقای انرژی در تانک هیدروژنی است. قید (۱۵) بهره برداری تانک را در محدوده مجاز خود تضمین می کند و نهایتا روابط (۱۶) و (۱۷) محدودیت های شار و دشارژ این ذخیره کننده انرژی هیدروژنی را برقرار می سازند. انرژی وارد شده به الکترولايز نباید بیشتر از حد مجاز خود باشد. این قید در رابطه (۱۸) آورده شده است.

$$P_e^{p2g, \min} \leq P_e^{p2g}(t, s) \leq P_e^{p2g, \max} \quad (18)$$

در انتهای این مدل سازی نیز لازم است که قید محدودیت تزریق هیدروژن به شبکه مورد توجه قرار گیرد. این قید به این دلیل لحاظ می شود چون ورود بیش از حد هیدروژن به داخل شبکه گاز طبیعی باعث خوردگی لوله ها می گردد. بنا براین با رابطه (۱۹) این محدودیت برقرار می شود.

$$\frac{P_{Direct}^{H_2}(t, s)}{P_{Direct}^{H_2}(t, s) + P_g(t, s) + P_G^{p2g}(t, s)} \leq \mathcal{E} \quad (19)$$

#### ۴- تست سیستم

در این بخش به ارائه اطلاعات تست سیستم در نظر گرفته شده پرداخت می شود. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، تست سیستم

### ۳-۲-۳- خطوط ارتباطی بین هاب ها

در مقاله حاضر خطوط ارتباطی بین هاب ها جهت تبادل انرژی در نظر گرفته شده است. از لحاظ فنی، این خطوط انرژی، چه از نوع الکتریکی، و چه از نوع گرمایی، دارای محدودیت انتقال هستند که باید در بهره برداری مورد توجه قرار گیرند. معادلات (۷) و (۸) بیانگر این محدودیت ها هستند.

$$|P_e^{ij}(t, s)| \leq P_{e,ij}^{\max} \quad (7)$$

$$|P_h^{ij}(t, s)| \leq P_{h,ij}^{\max} \quad (8)$$

### ۳-۲-۴- توربین بادی

در این مقاله توربین بادی به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. رابطه زیر، جهت تبدیل سرعت باد به توان تولیدی در توربین بادی، قابل استفاده است. لازم به ذکر است که سرعت باد تابعی از سناریو در نظر گرفته شده است تا مدل سازی به صورت اتفاقی صورت پذیرد.

$$P_e^W(t, s) = \begin{cases} 0 & v(t, s) \leq v^{in} \\ P_{rated}^W \frac{v(t, s) - v^{in}}{v^{rated} - v^{in}} & v^{in} \leq v(t, s) \leq v^{rated} \\ P_{rated}^W & v(t, s) \geq v^{out} \end{cases} \quad (9)$$

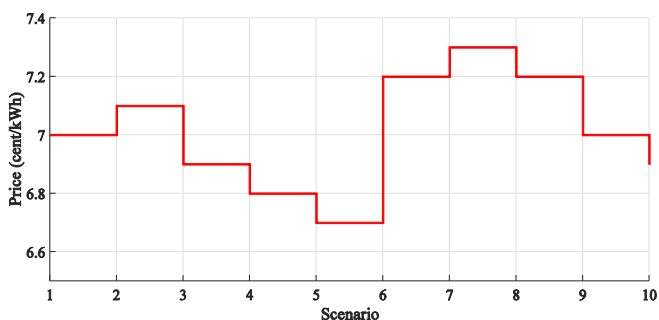
در مقاله حاضر امکان قطع تولید توربین بادی یا کاهش آن نیز به دلیل سهم چشمگیر آن در تامین انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده است. این امکان برای مقابله با نقض قید تعادل توان الکتریکی توسط خروجی متغیر توربین بادی لحاظ شده است. بنابراین قید تعادل توان الکتریکی در محل ورود توان از شبکه برق به شبکه هاب ها به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود.

$$P_e(t, s) + P_e^W(t, s) - P_{Curt}^W(t, s) = \sum_{k=1}^K P_e^k(t, s) \quad (10)$$

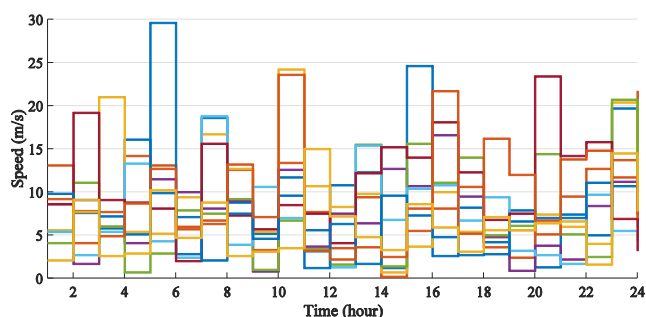
### ۳-۲-۵- سیستم مبدل برق به گاز

سیستم ذخیره کننده انرژی الکتریکی مبدل برق به گاز، با استفاده از معادلات زیر قابل مدل سازی ریاضی است. بدیهی است که متغیرهای سیستم مبدل برق به گاز نیز تابعی از سناریو خواهند بود. معادلات سیستم مبدل برق به گاز از چند بخش تشکیل شده است. ابتدا معادلات تعادل توان داخل سیستم است که به صورت معادلات (۱۱) تا (۱۳) قابل پیاده سازی است.

تصادفی تولید شده است. پارامترهای شبیه سازی نیز، در جدول (۱) نشان داده شده است. برای مدل سازی تلفات خطوط تبادل انرژی بین هاب ها نیز بازده این خطوط، چه گرمایی و چه الکتریکی ۹۱ درصد فرض شده است.

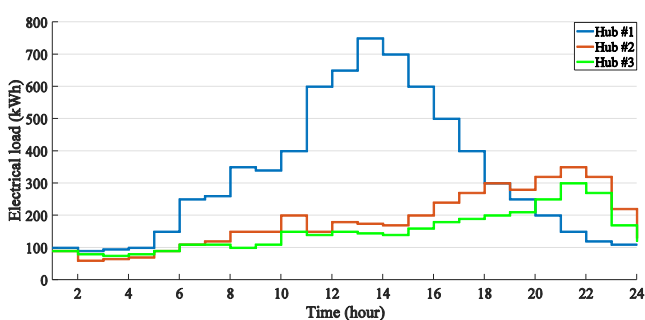


شکل ۴. قیمت گاز در سناریوهای مختلف

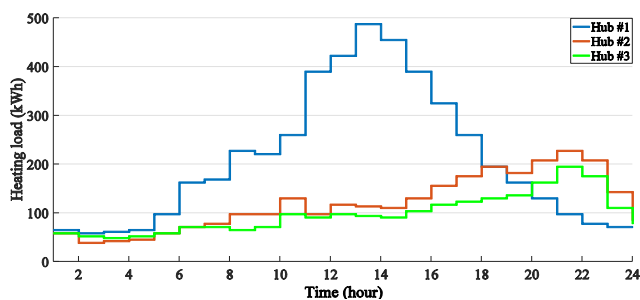


شکل ۵. سرعت باد در سناریوهای مختلف

برای بررسی احتمالاتی اثر حضور مبدل برق به گاز در مدیریت انرژی شبکه هاب ها، نتایج مدیریت انرژی بهینه برای دو حالت ارائه شده است. تست سیستم با وجود مبدل برق به گاز و بدون حضور آن.

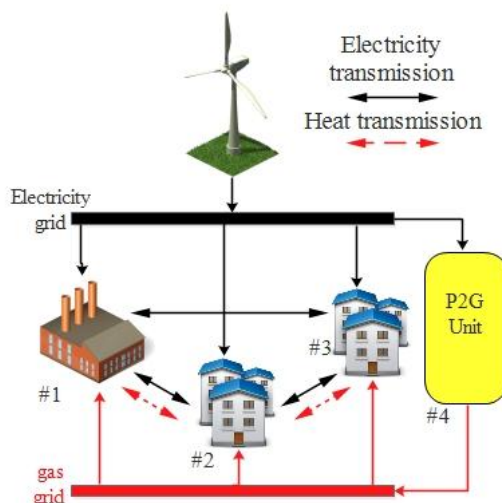


شکل ۶. بار پایه الکتریکی هاب ها



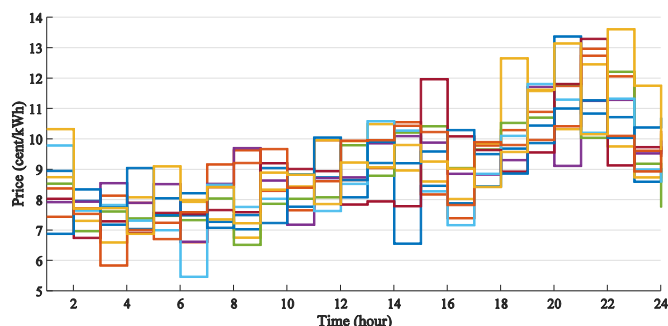
شکل ۷. بار پایه حرارتی هاب ها

شامل چهار هاب با امکان تبادل انرژی بین آن هاست. واحد مبدل برق به گاز نیز به عنوان یک هاب در نظر گرفته شده است. یک هاب به صورت صنعتی و دو هاب به صورت مسکونی در نظر گرفته شده است. هر هاب شامل یک ترانسفورماتور الکتریکی، یک واحد CHP و یک بویلر گازی است. تست سیستم دارای یک توربین بادی ۱.۵ مگاواتی است که به دلیل حجم بزرگ آن در مقایسه با بار هاب ها، قسمتی از تولید آن برای برقراری تعادل تولید و مصرف قطع می شود.



شکل ۲. تست سیستم

پارامترهای دارای عدم قطعیت، قیمت ساعتی برق، قیمت روزانه گاز، سرعت باد در هر ساعت و تقاضاهای انرژی در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی احتمالی این متغیرها، برای هر کدام، ۱۰ سناریو مختلف با احتمال یکسان در نظر گرفته شده است. سناریو با استفاده از روش مونت کارلو ایجاد شده است. شکل (۳) قیمت ساعتی برق را برای سناریوهای مختلف نشان می دهد. سناریوهای مختلف قیمت گاز نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. سرعت باد در ساعت مختلف و سناریوهای مختلف نیز در شکل (۵) قابل ملاحظه است.



شکل ۳. قیمت ساعتی برق در سناریوهای مختلف

بار الکتریکی و گرمایی پایه ساعتی برای هر هاب در شکل (۶) و (۷) نشان داده شده است. سناریوهای بارها، در هر ساعت، با استفاده از تابع نرمال و میانگین بار پایه و انحراف معیار ۱۰ درصد میانگین به صورت

جدول ۱. پارامترهای شبیه سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\eta_{CHP}^{ge}$	۰/۳۵	$P_{e,ij}^{max}$	۳۰۰	$\eta_{dis}$	۰/۹۵
$\eta_{CHP}^{gh}$	۰/۴	$P_{h,ij}^{max}$	۱۰۰	$\beta^{min}$	۰/۰۵
$\eta_{Boil}^{gh}$	۰/۸	$v^{in}$	۳	$\beta^{max}$	۰/۹۵
$\eta_{Tran}^{ee}$	۰/۹۸	$v^{rated}$	۱۰	$\alpha^{min}$	۰
$P_{CHP}^{min}$	۰	$v^{out}$	۲۲	$\alpha^{max}$	۰/۲
$P_{CHP}^{max}$	۵۰۰	$P_e^{p2g,max}$	۷۰۰	$P_{Tank}^{H_2, capa}$	۵۰۰
$P_{Boil}^{min}$	۰	$P_e^{p2g,min}$	۰	$\varepsilon$	۰/۰۱
$P_{Boil}^{max}$	۵۰۰	$\eta_{Electro}$	۰/۷		
$P_{Tran}^{min}$	۰	$\eta_{Methani}$	۰/۸۵		
$P_{Tran}^{max}$	۵۰۰	$\eta_{ch}$	۰/۹۵		

لازم به ذکر است که واحد تمامی توان ها به کیلووات و واحد انرژی کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

## ۵- آنالیز نتایج

ابتدا به بحث در مورد تاثیر حضور مبدل برق به گاز در پارامترهای اقتصادی و فنی شبکه هاب ها می پردازیم. نتایج شبیه سازی هر دو حالت در نظر گرفته شده (با مبدل و بدون آن) در جدول (۲) ارائه شده است.

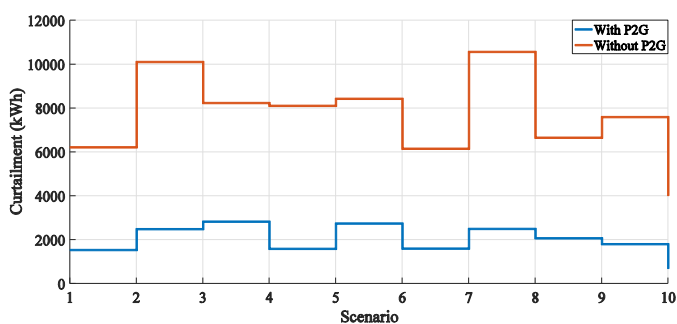
جدول ۲. نتایج شبیه سازی برای هر دو حالت

پارامتر	حالت اول (بی مبدل)	حالت دوم (با مبدل)	درصد کاهش
میزان تابع هدف (\$)	۱۳۴۱/۸	۱۱۲۴/۵	۱۶/۲
میانگین میزان برق ورودی از شبکه (kWh)	۵۹۴۱	۵۹۲۲	۰/۳
میانگین میزان گاز ورودی از شبکه (kWh)	۱۱۷۳۳	۸۶۶۴	۲۶/۲
میانگین میزان قطع تولید تجدید پذیر (kWh)	۷۶۱۴	۱۹۹۱	۷۳/۸

همانگونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، حضور مبدل برق به گاز به عنوان ذخیره ساز انرژی الکتریکی توانسته است هزینه بهره برداری سیستم را ۱۶/۲ درصد کاهش دهد. این کاهش به دلیل استفاده بیشتر از تولید منبع تجدید پذیر و عدم قطع آن است. پارامتری که حضور مبدل برق به گاز دچار تغییر شدیدی شده است، پارامتر میانگین

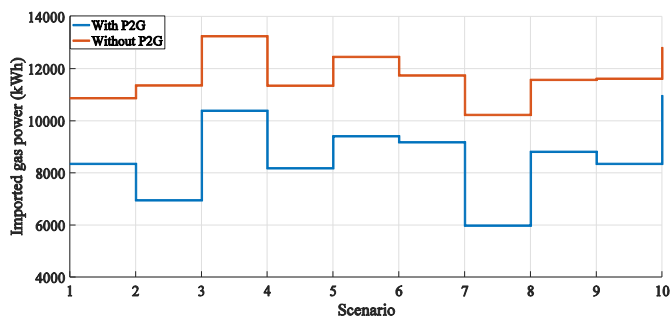
قطع تولید تجدید پذیر طی سناریو های مختلف است، که در حضور مبدل برق به گاز ۷۳/۸ درصد کاهش پیدا کرده است. این کاهش به معنای استفاده هر چه بیشتر از سرمایه گذاری انجام شده و جلوگیری از اتلاف انرژی تولید شده تقریباً بی هزینه است.

شکل (۸) میزان قطع تولید در سناریوهای مختلف را نشان می دهد. این شکل میزان مجموع قطع تولید در طی ۲۴ ساعت را برای هر سناریو و هر دو حالت به تصویر می کشد. همانگونه که در شکل نشان داده شده است حضور مبدل برق به گاز با مصرف انرژی مازاد منبع تجدید پذیر، و تحویل آن به صورت گاز با ذخیره در تانک هیدروژن، باعث کاهش قطع تولید تجدید پذیر در سناریوهای مختلف می گردد.

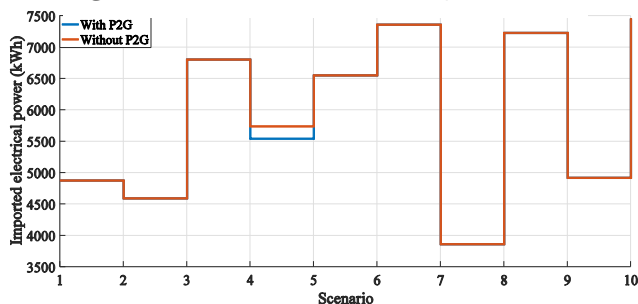


شکل ۸. میزان قطع تولید منابع تجدید پذیر

شکل (۹) و (۱۰) میزان ورود انرژی گاز طبیعی و الکتریکی را در طی سناریو های مختلف ارائه می دهد. همانگونه که در این شکل ها نشان داده شده است حضور مبدل برق به گاز باعث تامین انرژی گازی توسط مبدل و جلوگیری از تامین انرژی از شبکه گازی می شود ولی الکتریسیته ورودی تفاوت چندانی نخواهد کرد، زیرا مبدل انرژی ورودی خود را از اضافه تولید منبع تجدید پذیر تامین خواهد نمود.

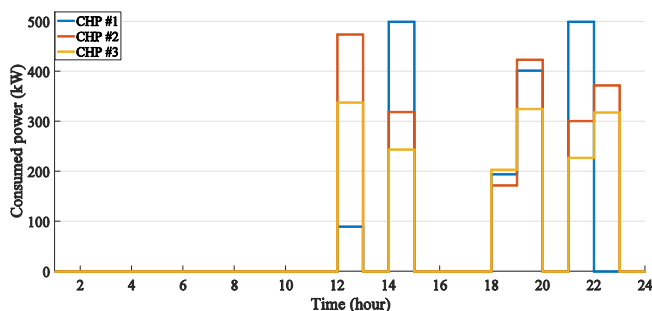


شکل ۹. میزان انرژی گازی ورودی از شبکه گاز طبیعی



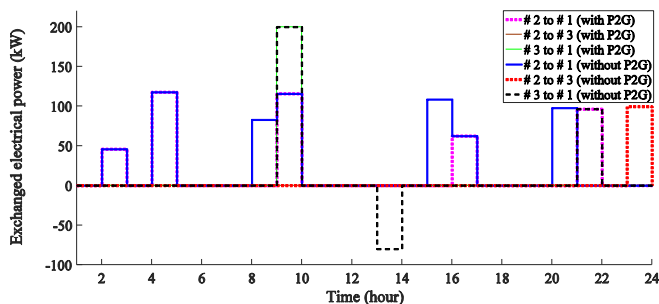
شکل ۱۰. میزان برق ورودی از شبکه

نحوه ی عملکرد بهینه CHP ها در دو حالت در نظر گرفته شده هیچ تفاوتی نکرده است. این عملکرد بهینه یکتا در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

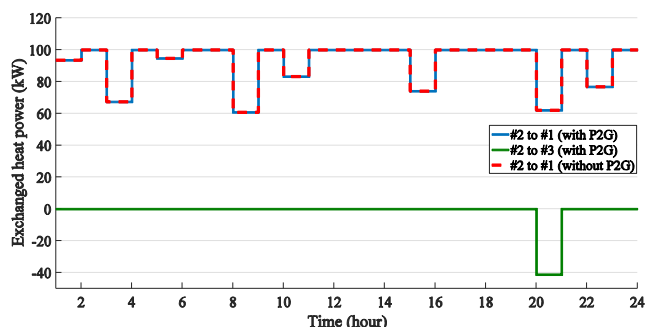


شکل ۱۴. عملکرد بهینه CHP ها در هر دو حالت (سناریو ۵)

نحوه تبادل انرژی در خطوط انرژی ما بین هاب ها نیز در شکل های (۱۵) و (۱۶) قابل مشاهده است. در حالت عدم حضور مبدل برق به گاز از خط انتقال انرژی گرمایی هاب ۲ به هاب ۳، هیچ انرژی عبور نمی کند. بدیهی است که مقادیر منفی در این شکل ها به معنای شارش انرژی در جهت عکس مسیر تعریف شده است.



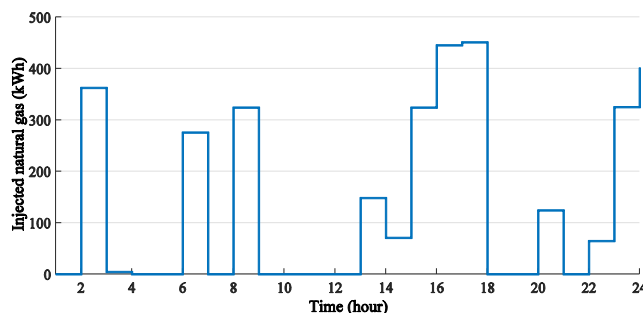
شکل ۱۵. تبادل انرژی الکتریکی بین هاب ها (سناریو ۵)



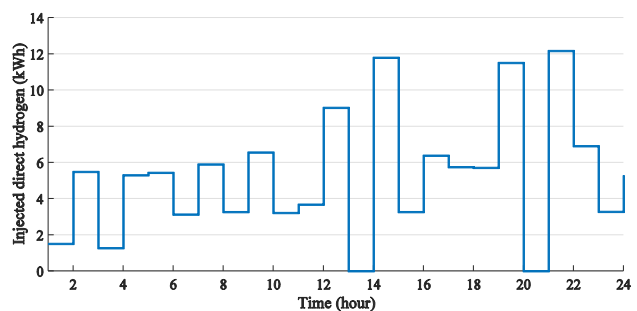
شکل ۱۶. تبادل انرژی گرمایی بین هاب ها (سناریو ۵)

در نهایت نیز، برای تعیین نقش ظرفیت الکترولایزر بر هزینه بهره برداری، یک آنالیز حساسیت صورت گرفته است. شکل ( ) که نشانگر این آنالیز است بیان می دارد که بعد از حجم ۸۰۰ کیلووات، افزایش ظرفیت الکترولایزر تقریباً هیچ تأثیری بر هزینه بهره برداری شبکه هابی نخواهد داشت.

گاز تزریقی به شبکه توسط مبدل برق به گاز به صورت متان (گاز طبیعی) و هیدروژن نیز در شکل (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است. همانگونه که پیشتر اشاره شده بود، به دلیل محدودیت تزریق هیدروژن مستقیم، میزان انرژی تزریقی از این طریق در سطح پایینی قرار دارد. لازم به ذکر است که به دلیل تعداد بالای شکل های خروجی، این شکل ها فقط برای سناریو ۵ رسم شده است.

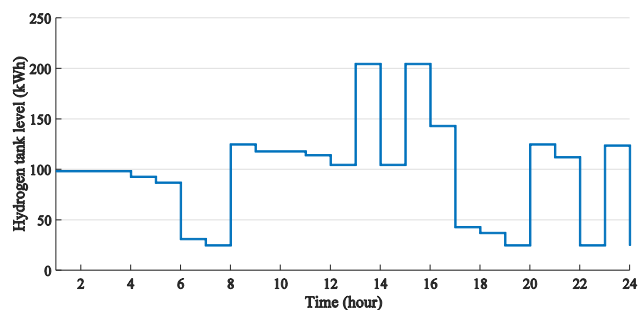


شکل ۱۱. میزان گاز تزریقی به شبکه توسط مبدل (سناریو ۵)



شکل ۱۲. میزان هیدروژن تزریقی به شبکه توسط مبدل (سناریو ۵)

عملکرد بهینه تانک هیدروژن نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این شکل که بیانگر تغییرات سطح ذخیره تانک است، به وضوح بیان می کند که این چگونه این تانک با شارژ در و دشارژ به موقع باعث کاهش هزینه بهره برداری می گردد.



شکل ۱۳. نحوه تغییرات سطح انرژی تانک هیدروژن (سناریو ۵)

به دلیل تعداد زیاد خروجی های بدست آمده برای تجهیزات، صرفاً در این بخش عملکرد بهینه CHP ها و نحوه تبادل انرژی در خط ها ما بین هاب ها ارائه می گردد. بدیهی است که با استفاده از این گزارشات، نحوه کار دیگر تجهیزات نیز قابل استخراج است.



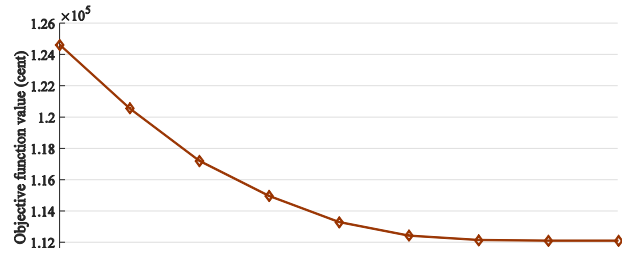
generation." IEEE Transactions on Power Systems 31.1 (2016): 304-316.

- [9] Aalami, Habib Allah, and Sayyad Nojavan. "Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation." IET Generation, Transmission & Distribution 10.1 (2016): 107-114.
- [10] Khani, Hadi, Mohammad R. Dadash Zadeh, and Amir H. Hajimiragha. "Transmission congestion relief using privately owned large-scale energy storage systems in a competitive electricity market." IEEE Transactions on Power Systems 31.2 (2016): 1449-1458.
- [11] Khani, Hadi, Mohammad R. Dadash Zadeh, and Amir H. Hajimiragha. "Transmission congestion relief using privately owned large-scale energy storage systems in a competitive electricity market." IEEE Transactions on Power Systems 31.2 (2016): 1449-1458.
- [12] Schiebahn, Sebastian, et al. "Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany." International journal of hydrogen energy 40.12 (2015): 4285-4294.
- [13] Götz, Manuel, et al. "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review." Renewable Energy 85 (2016): 1371-1390.
- [14] Clegg, Stephen, and Pierluigi 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 6.4 (2015): 1234-1244.
- [15] Peng, Dan. "Enabling utility-scale electrical energy storage through underground hydrogen-natural gas co-storage." (2013).
- [16] Maroufmashat, Azadeh, et al. "Mixed integer linear programming based approach for optimal planning and operation of a smart urban energy network to support the hydrogen economy." International Journal of Hydrogen Energy 41.19 (2016): 7700-7716.
- [17] Bucher, Matthias A., et al. "Modeling and economic evaluation of Power2Gas technology using energy hub concept." Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE. IEEE, 2015.
- [18] AlRafea, Kamal, et al. "Integration of renewable energy sources into combined cycle power plants through electrolysis generated hydrogen in a new designed energy hub." International Journal of Hydrogen Energy 41.38 (2016): 16718-16728.
- [19] Guandalini, Giulio, Stefano Campanari, and Matteo C. Romano. "Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment." Applied Energy 147 (2015): 117-130.

### زیر نویس‌ها

<sup>1</sup>Combined heat and power

<sup>2</sup>Stochastic



شکل ۱۶. آنالیز حساسیت بر حسب حجم الکترو لایزر

### ۶- نتیجه گیری

مبدل برق به گاز می تواند به عنوان یک ذخیره ساز انرژی الکتریکی در شبکه هاب ها مورد استفاده قرار گیرد و در شرایطی که نفوذ و سهم منابع تجدید پذیر بالاست، از اتلاف و هدر رفت انرژی تجدیدپذیر جلوگیری نماید. مبدل برق به گاز با ذخیره انرژی مازاد تجدیدپذیر در شبکه گازی و یا ذخیره آن در تانک هیدروژن منجر به کاهش هزینه بهره برداری می گردد. در این مقاله با بررسی احتمالی مدیریت انرژی هاب های شبکه ای در حضور مبدل برق به گاز، نشان داده شد که حضور مبدل می تواند هزینه بهره برداری را تا ۱۶/۲ درصد و میزان قطع منابع تجدید پذیر را تا ۷۳/۸ درصد کاهش دهد. شبیه سازی ها بر روی یک تست سیستم چهار هابه و توسط نرم افزار GAMS انجام شد.

### مراجع

- [1] Favre-Perrod, Patrick. "A vision of future energy networks." Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE. IEEE, 2005.
- [2] Vahid-Pakdel, M. J., et al. "Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response." Energy Conversion and Management 145 (2017): 117-128.
- [3] Pazouki, Samaneh, Mahmoud-Reza Haghifam, and Albert Moser. "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 61 (2014): 335-345.
- [4] Moeini-Aghtaie, Moein, et al. "Multiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability." IEEE Transactions on Sustainable Energy 5.2 (2014): 699-708.
- [5] Rastegar, Mohammad, et al. "A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs." IEEE Transactions on Smart Grid (2016).
- [6] Muruganatham, B., R. Gnanadass, and N. P. Padhy. "Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews 73 (2017): 125-134.
- [7] Masuta, Taisuke, et al. "Application of battery energy storage system to power system operation for reduction in pv curtailment based on few-hours-ahead PV forecast." Power System Technology (POWERCON), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016.
- [8] Sedghi, Mahdi, Ali Ahmadian, and Masoud Aliakbar-Golkar. "Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed