به‌کارگیری مخزن یخ در سیستم CCHP، منافع و محدودیت‌ها

پوریا کرمی[۱]، فرید قدمی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، *Pouria73@gmail.com*

۲- مربی گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، *Mania.farid@gmail.com*

چکیده

در دهه‌های اخیر در تمامی دنیا مقدار زیادی از مصارف انرژی در زمان‌های پرمصرف با استفاده از انواع گوناگون مخازن ذخیره انرژی به زمان‌های کم مصرف انتقال داده شده است. در این مقاله به بررسی تأثیر مخزن یخ در بهینه‌سازی مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی یک CCHP پرداخته شده‌است. مخزن یخ با انتقال زمانهای مصرف انرژی از زمانهای پرمصرف به ساعات کم‌مصرف موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود.الگوریتم MINLP نیز برای بدست‌آوردن و بررسی روش‌های بهینه سازی CCHP مورد استفاده قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: CCHP، مخزن یخ، بهینه‌سازی مصرف انرژی

۱- مقدمه

بهینه‌سازی انرژی به عنوان یک راه‌کار اساسی برای کاهش مصرف انرژی و نیز کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در کشورهای پیشرفته دنیا مطرح شده است. امروزه این کشورها به بهینه سازی و مدیریت انرژی به عنوان یک منبع جدید انرژی می‌نگرند. انرژی منبع جدایی‌ناپذیر برای تمام فعالیت‌های مبتنی بر انسان در مفهوم حیاتی است و تقریباً ورودی لازم برای تمام کالاها و خدمات استکه در هر مرحله از توسعه جامعه، مدیریت بر مصرف و نگهداری از آن ضروری است (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). در جوامع مدرن سطح توسعه و رفاه اقتصادی یک جامعه به طور مستقیم توسط تولید و مصرف انرژی اندازه‌گیری می شود.(Onar & Khaligh, 2015)

انرژی در حیات اقتصادی صنعتی جوامع کشورها نقش زیربنایی را ایفا می کند. به‌این‌معنا که، هرگاه انرژی به مقدار کافی و به موقع در دسترس باشد توسعه اقتصادی کشورها نیز میسر خواهد بود. تحریم نفتی اعراب در سال ۱۹۷۳ و تأثیر شگرف آن بر اقتصاد کشورهای توسعه یافته، علاقه به بهره‌وری اقتصادی بهتر در زمینه انرژی را افزایش داده است.(Sioshansi, 2013).

ساختار فعلی تولید انرژی و قدرت عمدتاً در صنایع حرارتی بزرگ با راندمان کلی ۳۰ تا ۵۰ درصد است و انرژی باید در مسافت‌های طولانی منتقل شود که این مسأله نیز ۲۰ درصد تلفات را درپی دارد.(Gu, Ren, Giao, & Ren, 2012). علاوه بر این حرارت زیادی در خروجی محرک‌های اولیه تولید بر موجود است که در صورت عدم بازیابی حرارتی در محیط زیست رها می‌شود و علاوه‌بر ضرر رسانی اقتصادی، مشکلات زیست محیطی نیز به دنبال خواهد داشت. (Martinez-Lera&Ballester,2010).

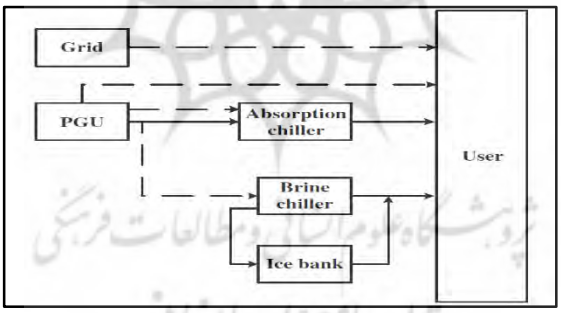
سیستم‌های CCHP به عنوان جایگزین کلیدی و مناسبی برای تولید گرما، و برودت شناخته می‌شوند. عملکرد این سیستم‌ها شامل همزمانی تولیدات گرما و برق است که باعث صرفه‌جویی بسیار زیادی در مصرف انرژی در مقایسه با سیستم‌های تامین انرژی سنتی می‌شود و خود این امر نیز موجب مصرف کمتر سوخت تولید شده و هم‌چنین آلودگی و خطر کمتری را برای محیط‌زیست به دنبال دارد. تکنولوژی‌های ذخیره انرژی از جمله این عوامل هستند که به سرعت تبدیل به

تکنولوژی‌های محبوب و کاربردی شده‌اند[۱]. آن‌ها می‌توانند انرژی را در زمان‌هایی که کاهش تقاضای مصرف وجود دارد ذخیره کرده و در زمان های اوج مصرف از آن استفاده کنند. از این رو اهمیت ذخیره انرژی موجب شده است که تکنولوژی‌های ذخیره ارزان، ذخیره انرژی گرمایی و مخازن انرژی های گرمایشی و سرمایشی با یکدیگر در سیستم CCHP ادغام شده‌اند[۱]. سیستم ذخیره انرژی گرمایشی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مدت زمان بازپرداخت را کاهش و سوددهی پروژه به سرمایه‌گذاران آن را با استفاده از تکنولوژی‌های ارزان و ساده افزایش دهد. اگر چه سیستم‌های CCHP نیازمند به سیستم های ذخیره انرژی گذرا هستند و فرآیند ذخیره‌سازی نیز در آنها گذرا است. بنابراین ایجاد یک استراتژی عملیاتی تاثیر گذار برای ذخیره انرژی گرمایی در سیستم‌های CCHP بسیار با اهمیت است.

مدلسازی MINLP نیز مدلی است که برای برطرف کردن مشکلات عملیات‌های کوتاه مدت با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی یک سیستم CCHP انتخاب شده است(Cui, et al.2015)

۲- سیستم CCHP ، با مخزن یخ

سیستم CCHP با مخزن یخ متشکل از بخش تولید قدرت، سیستم بازیافت انرژی هدر رفته، سیستم خنک کننده و سیستم مخزن یخ است که در شکل ۱ نشان داده شده است.در این مقاله از سیستم تهویه مخزن یخ به عنوان سیستم خنک کننده استفاده شده است که این سیستم خود از چیلرهای دو منظوره و مخزن یخ تشکیل شده است[۱]. این سیستم شامل بارهای برودتی و الکتریکی است که به ترتیب با خطوط توپر و خط چین مشخص شده‌اند(Cui, et al. 2015). سیستم تولید قدرت که سوخت مصرفی آن گاز طبیعی است زمانی که با دیماندهای الکتریکی و حرارتی مواجه می‌شود به طور همزمان به تولید گرما و الکتریسیته می‌پردازد، اگر در این شرایط انرژی مازادی وجود داشته باشد در مخزن یخ به کار گرفته شده در سیستم ذخیره خواهد شد. اگر بار حرارتی بیشتر از حدی باشد که سیستم تولید قدرت توانایی تولید آنرا دارد، مخزن یخ باقی‌مانده انرژی مورد نیاز را برای سیستم فراهم می‌آورد.



شکل۱ : جریان انرژی در یک سیستم CCHP [1]

۳- مدلسازی MINLP

Michael R.Bussieck و دوستان مدل MINLP را به‌صورت برنامه ریاضی با استفاده از متغیرهای گسسته و پیوسته غیر خطی در توابع و قیود آنها تعریف نموده‌اند. استفاده از این مدلسازی به صورت طبیعی برای فرمول‌بندی مسائلی است که در آن‌ها همزمانی بهینه‌سازی ساختار سیستم (به عنوان متغیر گسسته) و پارامترها (به عنوان متغیر پیوسته)حائز اهمیت است. حالت عمومی این مدلسازی به صورت زیر است:

$$minimize\ \ x\ subject\ to = \begin{cases} f_{(x,y)} \\ g_{(x,y)} \le 0 \\ x \in X \\ y \in Y \end{cases}$$

که در آن تابع $f_{(x,y)}$ تابع هدف و $g_{(x,y)}$ نیز تابع محدودیت است که هر دو آنها غیر خطی هستند. متغیر های x و y نیز متغیرهای تصمیم گیری هستند که y باید عددی صحیح باشد. X و Y نیز حدود متغیرها هستند[4]. برای دستیابی به اصول بیشتر از این مدلسازی می توان به [5] مراجعه کرد.

Cui و دوستان قیود و توابع مورد استفاده در مدلسازی CCHP با استفاده از MINLP را به‌صورت زیر بیان نموده‌اند:

۱ . مدت زمان بهینه سازی انرژی به عنوان $[t_0, t_f]$ در نظر گرفته می شود بازه زمان بندی انرژی نیز T است. بازه زمان بندی انرژی T شامل N_t مرحله است به گونه‌ای که $t_i = [t_0 + (i-1)T\ , t_0 + iT]\ , i = 1, \dots, N_t$.

۲ . در نظر گرفتن حرف j برای انواع انرژی $j = 1\ , \dots\ , N_j$ که N_j شامل تمامی انرژی ها است. به عنوان مثال $j = 1$ برای قدرت، $j = 2$ برای گرما و $j = 3$ را برای برودت در (CCHP) در نظر گرفته‌اند.

۳ . برای شماره دستگاه ها نیز k در نظر گرفته شده است به طوریکه $k = 1\ , \dots\ , N_k$ و N_k نشان‌دهنده‌ی تمامی دستگاه‌ها است. N_s نشان دهنده تعداد دستگاه های مبدل انرژی است. N_c نشان دهنده دستگاه‌های مکمل چند انرژی‌ای است. N_m نشان‌دهنده‌ی دستگاه‌های دینامیکی است و N_n نیز بیان کننده دستگاه‌های ذخیره انرژی است.

۴ . U به عنوان دستگاه ها و Q برای انرژی تولید شده و یا مصرفی آنها در نظر گرفته می شود . برای یک دستگاه می توان U_k را در نظر گرفت و برای انرژی تولیدی یل مصرفی نیز می توان از $Q_{k,j}$ استفاده کرد. به عنوان مثال موتور احتراق داخلی می تواند به عنوان U_1 در نظر گرفته شود، هنگامیکه برق تولید کند با $Q_{1,1}$ و در زمان تولید گرما با $Q_{1,2}$ و در زمان برودت $Q_{1,3}$ نشان داده شود.

۳-۱- پارامترها و متغیرها

پارامترهای تغییر زمان:

متغیرهای زمانی پارامترهایی هستند که ممکن است در طول یک بازه زمانی به عنوان نوسانات تقاضا و یا دمای محیط دچار تغییر شوند از این رو دارای مقدارهای متفاوتی در هر دوره زمانی t هستند:

$p_j(i)$: تقاضاهای انرژی در زمان t

$pb_j(i)$: قیمت خرید انرژی در زمان t

$ps_j(i)$: قیمت فروش انرژی در زمان t

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

ثابت :

$cm_{k,j}$: هزینه های تعمیر و نگهداری دستگاه ها، که متناسب است با میزان انرژی تولیدی

cs_k: هزینه های راه اندازی اولیه که متناسب است با تعداد شروع ها

$ch_{k,j}$: مقدار انرژی هدر رفته از دستگاه های ذخیره سازی که متناسب است با مدت زمان

متغیر های پیوسته:

$Q_{k,j}(i)$: انرژی j مصرف شده و یا عرضه شده در دستگاه k در زمان I

$\Delta Q_{k,j}(i)$: نشان دهنده میزان انرژی j ذخیره شده در دستگاه های ذخیره سازی انرژی متفاوت در فاصله زمانی i و i-1

$s_{k,j}(i)$: انرژی j ذخیره شده در دستگاه های ذخیره انرژی k در زمان i

متغیر های دوتایی:

$z_k(i)$: متغیر های حالت دستگاه k در زمان i

$m_j(i)$: متغیر های حالت نشان دهنده اینکه انرژِی j خریداری شده است.

۳-۲- هدف

مقصود مدلسازی Cui و دوستان به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$min \sum_{i=1}^{N_t} C_b\,(i) - \sum_{i=1}^{N_t} C_s\,(i) + \sum_{i=1}^{N_t} C_{on}\,(i) + \sum_{i=1}^{N_t} C_l\,(i) \quad (۱)$$

$C_b(i)$ هزینه انرژی تمام دستگاه‌ها در زمان i است، که از مجموع مقدار سوخت هر دستگاه ضرب در هزینه های خاص خود به دست می‌آید.

$$C_s(i) = \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} p_s(i) Q_{k,j}(i) \quad (۲)$$

$C_{on}(i)$ هزینه راه اندازی تمامی دستگاه ها در زمان i است که از هزینه های اضافی همراه با روند شروع به کار بدست می‌آید .

$$C_{on}(i) = \sum_{k=1}^{N_k} cs_k(i) Z_k(i) \quad (۳)$$

$C_s(i)$ از طریق ضرب مقدار انرژی الکتریکی خریداری شده و یا فروخته شده از شبکه در هر ساعت بدست می‌آید .

$$C_s(i) = \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} p_s(i) Q_{k,j}(i) \quad (۴)$$

۳-۳- قیود

قید تعادل بار انرژی:

قید تعادل این اطمینان را می دهد که نیاز های متقاضی انرژی همیشه توسط دستگاه‌های تولیدکننده انرژی j در زمان i به صورت زیر انجام می‌پذیرد :

$$\sum_{k=1}^{N_s} Q_{j,k}\,(i) + \sum_{k=1}^{N_c} Q_{j,k}\,(i) + \sum_{k=1}^{N_m} Q_{j,k}\,(i) + \sum_{k=1}^{N_n} \Delta Q_{j,k}\,(i) = P_j(i) \quad (۵)$$

به‌طوریکه $Q_{k,j}(i)$ انرژی j تولید شده و یا مصرف شده توسط دستگاه k است و $\Delta Q_{k,j}(i)$ متغیر انرژی j ذخیره شده در دستگاه k در طول زمان i است.

طبق مدل Cuiو دوستان، برای آسان تر شدن عملکرد متغیر sl_j تعریف می‌شود تا باعث سادگی و حل قیود شود.

$$\sum_{k=1}^{N_s} Q_{j,k}\,(i) + \sum_{k=1}^{N_c} Q_{j,k}(i) + \sum_{k=1}^{N_m} Q_{j,k}(i) + \sum_{k=1}^{N_n} \Delta Q_{j,k}(i) + sl_j = P_j(i) \quad (۶)$$

قید راه اندازی دستگاه:

قید های راه اندازی برای بدست آوردن حداکثر روشهای راه اندازی، که هر دستگاه به دور از خراب شدن می تواند تحمل کند، مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\sum_{i=1}^{N_T} \Delta T_{k,i} \le N_k \quad (۷)$$

برای اینکه متغیرها مقدار ۱ را در زمان i داشته باشند تنها راه این است که دستگاه k در زمان i خاموش باشد که موجب قیود زیر می شود:

$$\begin{aligned} &\Delta T_{k,i} \ge Z_k(i) - Z_k(i-1) \\ &\Delta T_{k,i} \le 1 - Z_k(i-1) \\ &\Delta T_{k,i} \le Z_k(i) \end{aligned} \quad (۸)$$

قید عملکرد:

قید عملکرد کارایی دستگاه را تضمین می‌کند . برای هر دستگاه متغیرهای ورودی (برق و سوخت مصرفی) از طریق تابع عملکرد به متغیرهای خروجی (گرمای تولیدی ، برق و برودت) مرتبط می‌شود.

توربین گاز: کارایی توربین گازی به طور مستقیم به عنوان محرک اصلی بر روی کارایی سیستم (CCHP) تاثیر خواهد داشت. فاکتورهای اصلی که بر روی عملکرد توربین گازی تاثیر خواهند داشت عبارتند از دما، رطوبت مطلق، ارتفاع، افت فشار ورودی هوا و میزان بار تخلیه شده از دریچه خروجی. برای سهولت در مدل ایجاد شده توسط Cui و دوستان قدرت خروجی توربین گازی، مصرف سوخت و گرمای خروجی متناظر قابل بازیافت در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضرایب مدل متناسب با داده های کارکرد توربین گازی توسط Cui و دوستان انتخاب شده اند.

قیود سوخت مصرفی:

$$Q_{k,0}(i) = \sum_{j=1}^{m} a_n^j Q_{k,j}^n(i) + \cdots + a_2^j Q_{k,j}^2(i) + b_j \quad (۹)$$

قیود بازیافت حرارت:

$$Q_{k.j'}(i) = c_n^j Q_{k,j}^n(i) + \cdots + c_2^j Q_{k,j}^2(i) + c_1^j Q_{k,j}(i) + b_j \quad (۱۰)$$

چیلر: در سیستم (CCHP) اکثر اوقات به صورت بارگذاری موقت کار می‌کند. بارهای متفاوت دستگاه بستگی به ضریب عملکردهای متفاوت دارد. چیلر های دو کاره (dual-mode) با استفاده از الکتریسیته مصرفی مدل سازی شده اند به طوریکه مدل سازی آنها به دو شرایط برودت و یخ تقسیم می‌شود. ضریب برگشت پذیری هر مدل نیز با یکدیگر تفاوت دارد.

$$Q_{k.j'}(i) = a_n Q_{k,j}^n(i) + \cdots + a_2 Q_{k,j}^2(i) + a_1 Q_{k,j}(i) + b \quad (۱۱)$$

سیستم مخزن یخ: سیستم تهویه هوا با مخزن یخ از سیستم های تهویه هوای معمولی متفاوت است. مخزن یخ یک دستگاه تولید قدرت نیست اما عملکرد ذوب شدن یخ تاثیر بسیار زیادی بر روی این سیستم دارد. برای سادگی حداکثر عملکرد ذوب شدن یخ توسط Cui و دوستان ثابت فرض شده است.

قید مخزن یخ:

$$Q_{min,j} \le Q_{k,j}(i) \le Q_{max,j} \quad (۱۲)$$

بطوریکه $Q_{k,j}(i)$ یخ ذخیره شده در دستگاه در زمان i و $Q_{min,j}$ و $Q_{max,j}$ مقدار های حداقل و حداکثر یخ ذخیره شده در دستگاه هستند.

قید میزان ذوب شدن یخ:

$$Q_{k,j}(i) - Q_{k,j}(i-1) \le \Delta Q_{max,j} \quad (۱۳)$$

به‌گونه‌ای که $\Delta Q_{max,j}$ حداکثر مقدار ذوب شدن در فاصله زمانی i و i-1 است.

قیود متغیر:

$$Q_{k,j}(i) = Q_{k,j}(i-1) + \Delta Q_{k,j}(i) \quad (۱۴)$$

۴- منافع اقتصادی حاصل از به‌کارگیری مخزن یخ

مخزن یخ یکی از تکنولوژی‌های ذخیره حرارتی است که به طور گسترده در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته است تا از طریق انتقال زمان استفاده از انرژی از زمان‌های اوج مصرف به زمانهای کم‌مصرف موجب کاهش برق مصرفی و هزینه‌های اقتصادی شود. اگر بار برودتی مورد نیاز بیشتر از بار برودتی مجاز به استفاده در زمان‌های اوج و عادی مصرف برق باشد، محرک اصلی تحت شرایط متغیری عمل می‌کند. همچنین محرک اصلی در زمانیکه تقاضای بار برودتی بیشتر از بار

اسمی محرک باشد نیز همین شرایط را دارا است. مخزن یخ در زمانیکه بار برودتی بیشتر از بار اسمی محرک و کمتر از مجموع بارهای محرک اصلی و سیستم در حالت ذوب شدن باشد و همچنین در زمانی که بار برودتی کمتر از بار اسمی محرک اصلی که در شرایط عادی خود کار می‌کند قرار داشته باشد به عنوام مکمل محرک اصلی در حالت ذوب کار می کند که این عملکرد سیستم یخ می‌تواند هزینه‌های اقتصادی را در یک CCHP تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد[۱].

مقایسه عملکرد سیستم در هنگامی‌که مخزن یخ مورد استفاده قرار می‌گیرد با هنگامی که در سیستم لحاظ نمی شود، نشان می‌دهد که میزان مصرف ماهانه انرژی در سیستم بالا می رود، از دلایل اصلی این اتفاق می‌توان به کارکرد کمتر چیلر برای خنک کردن آب با دمای پایین‌تر اشاره کرد و چون بخش عمده ای از این انرژی نیز در زمانهای کم مصرف مورد استفاده قرار گرفته است، هزینه انرژی مصرفی به طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند[۱].

۵- مروری بر مطالعات موردی

مخازن ذخیره انرژی گرمایی شامل تعداد زیادی از تکنولوژی‌هایی هستند که انرژی را در این مخازن برای اسفاده در زمان‌های دیگر ذخیره می‌کنند. تکنولوژی مخزن یخ نیز یکی از همین تکنولوژی‌ها است که در بسیاری از کشورها برای مصرف کمتر انرژی الکتریکی و در نتیجه آن کاهش هزینه‌های اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. در مواردی از این تکنولوژی در یک ساختمان‌های اداری نیز استفاده شده است [۲] که در مقایسه با زمانیکه مخزن یخ بر روی سیستم آن نصب نشده است می‌توان مشاهده کرد که به میزان ۴٪ انرژی کمتری در سیستم استفاده شده است، هم چنین مقدار دی‌اکسیدکربن تولید شده نیز با استفاده از مخزن یخ کاهش پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری

برای بهبود اقتصادی سیستم انرژی مخزن یخ در CCHP مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از مدلسازی MINLP نیز می‌توان این فرآیند را مورد بررسی قرار داد و بررسی کرد. با بررسی عملکرد بخش‌ها به صورت غیر خطی و مشاهده‌ی نتایج می‌توان این موضوع را دریافت که استفاده از مخزن می‌تواند باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های اقتصادی یک CCHP شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

منابع

[1] Cheng-gang Cui,.et al.Optimization of Combined Heat and Power Generation System with Ice Thermal Storage. Springer verlag Berlin Heidelberg. Pp 13-23.2015

[2]Christopher L.Hall,Dante Freeland and Nabil Nassif.Optimizing Ice Thermal Storage to reduce Energy cost .Springer International Publoshing Switzerland.pp195-202.2016

[۳] کریمی علویجه, سعید؛ کامبیز رضاپور و رامین کرمی، ۱۳۸۹، به کارگیری چیلر جذبی در سیستم تولید همزمان سرما، گرما و الکتریسیته(CCHP) ، نخستین همایش چیلر و برج خنک کن ایران، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا،

[4]Michael R.Bussieck, Armin Pruessner.Mixed Integer Nonlinear Programming . GAMS Developrment corporation.NW Washington.2003

[5]C.A.Floudas, onlinear and Mixed Integer Optimization: Fundamentals and applications.Oxford University Press.New York NY.1995

[۶] زارع، غلامرضا و مجتبی میرزایی، ۱۳۹۴، بررسی سیستم CCHP با محرک اولیه میکروتوربین گازی در بهره‌وری انرژی وبهره‌وری اقتصادی سوخت مصرفی، کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم وس تکنولوژی، تهران، موسسه سرآمد همایش کارین.