

بهره‌برداری بهینه اقتصادی از سیستم انعطاف‌یافته تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرما

سید مجید میری لاریمی^{1*}، محسن پارسا مقدم²، مجید شهابی³

¹ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

m.miri@modares.ac.ir

² استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

parsa@modares.ac.ir

³ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

shahabi.m@nit.ac.ir

چکیده: بهره‌برداری بهینه از سیستم تولید هم‌زمان حرارت و توان الکتریکی (CHP) به نوع بهره‌برداری و میزان انعطاف آن در شرایط گوناگون بار شبکه بستگی خواهد داشت؛ لذا چالش‌های مالی و فنی هم در نحوه انتخاب این سیستم‌ها و هم در نحوه به‌کارگیری بهینه اقتصادی از آن‌ها مطرح خواهد شد. در این مقاله، ابتدا یک سیستم CHP که شامل بویلر کمکی، سیستم سرمایشی جذبی و کمکی است، با افزودن واحدهای ذخیره‌کننده انرژی حرارتی و الکتریکی انعطاف یافته و سپس نحوه بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر ارائه شده است. تابع هدفدار این سیستم عبارت است از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم انعطاف‌یافته مذکور در طول یک روز. با حداقل‌سازی تابع هدف ارائه‌شده، نحوه بهره‌برداری از سیستم مورد نظر طوری تعیین می‌شود که بارهای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی در تمام ساعات تأمین شود. مطالعات موردی، با در نظر گرفتن بار برای سه روز معتدل، زمستانی و تابستانی و همچنین بررسی سیستم در سه حالت عدم حضور سیستم CHP، حضور سیستم CHP و حضور هم‌زمان سیستم CHP و ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی انجام شده است. این مطالعات فواید به‌کارگیری از سیستم انعطاف‌یافته مورد نظر را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و نحوه به‌کارگیری مناسب از آن را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: CHP، ذخیره‌کننده انرژی، بهره‌برداری بهینه اقتصادی.

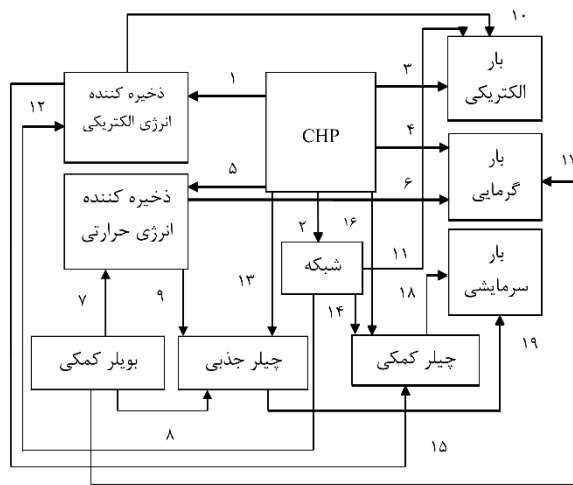
1. مقدمه

در این مقاله، به منظور افزایش انعطاف سیستم CHP در شرایط مختلف، ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی به صورت هم‌زمان به سیستم مورد نظر افزوده شده است؛ با اضافه شدن این ذخیره‌سازها امکان ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی به وجود آمده است. این نوع سیستم CHP، (CHP-Storage) نامیده شده است. دیاگرام گذر انرژی گرمایی، سرمایشی و الکتریکی سیستم انعطاف‌یافته مورد نظر در این مقاله، در شکل (1) نشان داده شده است. با توجه به انعطاف به وجود آمده در سیستم و به وجود آمدن امکان ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که میزان مصرف انرژی اندک یا هزینه این انرژی پایین است و همچنین با بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر، می‌توان راندمان کاری سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت را افزایش داد.

در ادامه، در بخش 2 سیستم پیشنهادی این مقاله تشریح شده است. در بخش 3 با بیان مدل‌سازی ریاضی سیستم، نحوه بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر بیان شده است. در بخش 4 با بیان یک مطالعه عددی از سیستم مورد نظر، نتایج بهره‌برداری از سیستم در یک بازه زمانی 24 ساعته ارائه شده است.

2. شرح سیستم

سه نوع انرژی در سیستم مورد نظر جریان دارد: انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی و انرژی سرمایشی. همچنین فرض شده است که سیستم به شبکه متصل است. راهبرد مدیریت این سیستم از نگاه مصرف‌کننده انرژی، که خود مسئول آن است، بررسی شده است. به طور کلی، دو گروه مشتری وجود دارد: یکی از آن‌ها شبکه است که می‌تواند برق تولیدی این سیستم را بخرد و بقیه بارهای محلی می‌باشند که خود شامل بارهای گرمایی، سرمایشی و الکتریکی هستند.



شکل (1): دیاگرام گذر انرژی در سیستم CHP-Storage

با تغییر ساختار بازار برق، قیمت برق در بازار می‌تواند متأثر از عواملی همچون برهم خوردن عرضه و تقاضا، محدودیت ظرفیت خطوط انتقال، تغییر قیمت سوخت در بازار و عواملی دیگر تغییر کند [1]. با افزایش روزافزون نیاز به انرژی، استفاده از روش‌هایی برای کنترل عوامل فوق، در نتیجه کنترل قیمت برق در بازار ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه‌هایی که می‌توان محدودیت ظرفیت انتقال را کنترل کرد، استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده است [1]. از طرفی، سهم بسیار زیادی از مصرف انرژی، مربوط به انرژی سرمایشی و گرمایشی است که می‌توان از انرژی حرارتی تلف‌شده سیستم‌های تولید پراکنده برای این منظور استفاده کرد؛ در نتیجه، علاوه بر کاهش تقاضای انرژی الکتریکی از شبکه، بازده سیستم‌های تولید پراکنده به واسطه تولید هم‌زمان برق و حرارت افزایش می‌یابد [2]. امروزه علاوه بر تغییر قیمت در بازار برق و بازده انرژی، نگرانی‌هایی هم در خصوص افزایش گازهای گل‌خانه‌ای وجود دارد که با تولید هم‌زمان حرارت و برق می‌توان انتشار گاز گل‌خانه‌ای را نیز کاهش داد [3]. همه این عوامل علاقه به استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان انرژی حرارتی و الکتریکی (CHP) را افزایش داده است. سیستم‌های CHP در بخش‌های خانگی، صنعتی و تجاری قابل استفاده است و استفاده از آن‌ها هزینه‌های پرداختی مصرف‌کننده انرژی را نیز کاهش می‌دهد [4]. از طرفی، بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها، به میزان انعطاف آن‌ها در شرایط گوناگون بار الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی شبکه بستگی خواهد داشت. با اضافه کردن ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی می‌توان انعطاف این سیستم‌ها را افزایش داد؛ به طوری که با به‌کارگیری از این ذخیره‌سازها می‌توان انرژی را در زمان‌هایی که نیاز به انرژی الکتریکی یا گرمایی کم است، ذخیره کرد و در زمان‌های اوج بار که قیمت انرژی افزایش می‌یابد، از آن استفاده کرد. در [5] نشان داده شده است که با افزودن یک منبع ذخیره‌ساز حرارتی به سیستم، می‌توان کارایی و بهره‌وری سیستم تولید هم‌زمان را افزایش داد. در این مرجع، از باتری الکتریکی به علت عمر پایین و هزینه بالای آن استفاده نشده است. با پیشرفته تر شدن تکنولوژی ساخت باتری و افزایش عمر این تجهیزات، امکان استفاده گسترده‌تر از این باتری‌ها به وجود آمده است [6-7]. همچنین با عمومی‌تر شدن استفاده از تجهیزات پیل سوختی و باتری سوختی، این امکان برای سیستم به وجود آمده است که در شرایطی بتوان از حرارت تولیدشده در این باتری‌ها، در حین تولید و ذخیره انرژی الکتریکی استفاده کرد [8-9].

$$+ LMC \times \left(\sum_{K=12}^{K=17} (d_{pk} - x_{11k}) \right) \quad (\text{هزینه مدیریت بار الکتریکی})$$

$$- pr_{sk} \times \lambda \times x_{2k} \quad (\text{درآمد حاصل از فروش برق به شبکه})$$

محدودیت‌های سیستم عبارت‌اند از:

1. همه تقاضاهای انرژی پاسخ داده می‌شوند روابط (1 تا 3).

$$x_{10k} + x_{1k} + x_{12k} + x_{15k} = d_{pk} \quad (1)$$

$$x_{4k} + x_{7k} + x_{17k} = d_{tk} \quad (2)$$

$$x_{18k} + x_{19k} = d_{ck} \quad (3)$$

2. همه محدودیت‌های حداکثر و حداقل برای سیستم‌های تولید در نظر گرفته می‌شوند روابط (4 تا 8).

$$AB_L \leq x_{7k} + x_{8k} + x_{17k} \leq AB_H \quad (4)$$

$$P_{\min} \leq x_{3k} + x_{1k} + x_{2k} \leq P_{\max} \quad (5)$$

$$h_{\min} \leq x_{5k} + x_{4k} + x_{13k} \leq h_{\max} \quad (6)$$

$$c_{\min} \leq x_{18k} \leq c_{\max} \quad (7)$$

$$ac_{\min} \leq x_{19k} \leq ac_{\max} \quad (8)$$

3. محدودیت ذخیره‌سازی و مصرف انرژی ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته می‌شود روابط (9 تا 16).

$$\alpha_h \times (x_{5k} + x_{7k}) \leq R_{h1} \times \Delta t \quad (9)$$

$$\delta_h \times (x_{6k} + x_{9k}) \leq R_{h2} \times \Delta t \quad (10)$$

$$\alpha_p \times (x_{1k} + x_{12k}) \leq R_{p1} \times \Delta t \quad (11)$$

$$\delta_p \times (x_{10k} + x_{15k}) \leq R_{p2} \times \Delta t \quad (12)$$

$$sto_{hk} = init_h \times (1 - \mu_h)^k + \sum_{j=1}^{j=k} \{ \alpha_h \times (x_{5j} + x_{7j}) - (x_{9j} + x_{6j}) / \delta_h \} \times (1 - \mu_h)^{(k-j+1)} \quad (13)$$

$$sto_{pk} = init_p \times (1 - \mu_p)^k + \sum_{j=1}^{j=k} \{ \alpha_p \times (x_{1j} + x_{12j}) - (x_{15j} + x_{10j}) / \delta_p \} \times (1 - \mu_p)^{(k-j+1)} \quad (14)$$

$$Y_{0h} \leq sto_{hk} \leq R_{th} \quad (15)$$

$$Y_{0p} \leq sto_{pk} \leq R_{tp} \quad (16)$$

در این سیستم، اولویت با بارهای محلی است و در صورت کمبود انرژی، می‌توان آن را توسط شبکه جبران کرد. بار الکتریکی مورد نیاز می‌تواند از مسیرهای 3، 11 و 10 به ترتیب توسط سیستم CHP، شبکه و باتری تأمین شود. بار حرارتی نیز از طریق مسیرهای ۶، ۱۷ و 4 به ترتیب توسط ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، بویلر اضطراری و سیستم CHP تأمین می‌شود. همچنین بار سرمایشی نیز می‌تواند توسط سیستم سرمایشی جذبی و کمکی تأمین شود. سیستم سرمایشی کمکی در صورتی که نیاز به انرژی سرمایشی بیشتر از تولید سیستم سرمایشی جذبی باشد، وارد مدار می‌شود. انرژی الکتریکی سیستم سرمایشی کمکی نیز می‌تواند از طریق CHP، باتری یا شبکه تأمین شود. با قرار دادن باتری در سیستم این امکان به وجود آمده است که در مواقعی که قیمت برق شبکه پایین است، در صورت امکان، انرژی الکتریکی را از شبکه خریداری و در آن ذخیره کرد. انرژی الکتریکی اضافی تولیدی CHP نیز می‌تواند در باتری ذخیره شود. همچنین حرارت اضافی تولید شده توسط CHP یا بویلر کمکی نیز می‌تواند در ذخیره‌ساز انرژی حرارتی ذخیره شود. با توجه به امکانات به وجود آمده، قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش خواهد یافت؛ زیرا بارهای موجود در سیستم می‌توانند از مسیرهای مختلف تأمین شوند.

3. بیان مسئله

برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر، تابع هدف این سیستم به گونه‌ای بیان شده است که گذر انرژی در سیستم CHP-Storage را در هر ساعت طوری مشخص کند که کل هزینه‌های پرداختی توسط مصرف‌کننده مطابق زیر حداقل شود:

$$obj \text{ func} = \min \sum_{k=1}^{k=24} pr_{nk} \times (x_{11k} + x_{12k} + x_{14k}) \quad (\text{کل هزینه خرید برق از شبکه})$$

$$+ pr_{fk} \times (F_{CHPk} + F_{bk}) \quad (\text{هزینه‌های پرداختی برای سوخت})$$

$$+ pr_{sp} \times (x_{10k} + x_{1k} + x_{12k} + x_{15k}) \quad (\text{هزینه‌های شارژ و دشارژ باتری})$$

$$+ pr_{sh} \times (x_{5k} + x_{6k} + x_{7k} + x_{9k}) \quad (\text{هزینه‌های ورود و خروج انرژی از ذخیره‌ساز انرژی گرمایی})$$

$$+ IPCC \quad (\text{کل هزینه‌های داخلی و تعمیر و نگه داری سیستم})$$

$$+ pr_c(x_{19k}) \quad (\text{هزینه تولید سرما توسط سیستم جذبی})$$

4. مطالعه موردی

بررسی سیستم مورد نظر با مقایسه سه حالت زیر انجام شده است.

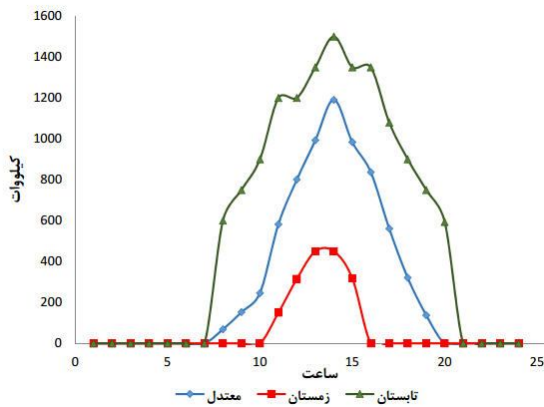
1. بررسی سیستم بدون در نظر گرفتن CHP و ذخیره‌کننده‌های انرژی
2. بررسی سیستم با ورود CHP

3. بررسی سیستم با ورود ذخیره‌سازها و CHP به سیستم مورد نظر در حالت اول بار الکتریکی توسط شبکه، بار گرمایشی توسط بویلر و بار سرمایشی توسط سیستم سرمایشی جذبی و چیلر تأمین می‌شود. در حالت دوم CHP نیز در تأمین این بارها سهم می‌شود و در حالت سوم، با اضافه شدن ذخیره‌کننده‌ها تأمین بارها به صورت مدل پیشنهادی در این مقاله است. شایان ذکر است که همه هزینه‌های داخلی و تعمیر و نگهداری سیستم (IPCC) در حالت اول 50 دلار، در حالت دوم 110 دلار و در حالت سوم، 119 دلار در نظر گرفته شده است [10-12].

برای بررسی انعطاف سیستم در شرایط گوناگون بار شبکه، بارهای سرمایشی و گرمایشی مطابق با شکل‌های (2) و (3) برای سه روز معتدل، تابستانی و زمستانی در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است بار الکتریکی در هر سه روز مطابق با شکل (4) است.

4.1. حالت اول: روز معتدل

با توجه به شکل (2)، (3) و (4) و با توجه به اینکه تقاضای انرژی برای یک روز معتدل است، در ابتدا و پایان روز نیاز به انرژی گرمایی بیشتری می‌باشد. همچنین نیاز به انرژی سرمایشی در میانه روز و نیاز به انرژی الکتریکی در کل طول روز وجود دارند. به منظور دست‌یافتن به وضعیت بهینه اقتصادی نیاز است که قیمت خرید و فروش برق به شبکه در هر ساعت در طول روز مشخص باشد.



شکل (2): بار سرمایشی

4. اگر خروجی سیستم جذبی، کفاف نیاز سرمایی را بدهد، سیستم سرمایشی کمکی خاموش می‌ماند رابطه (17).

$$\text{if } d_{ck} \leq x_{19k} \quad \text{then } x_{18k} = 0 \quad (17)$$

5. اگر نیاز گرمایی از AB_L کمتر باشد، بویلر کمکی خاموش می‌شود (رابطه 18).

$$\text{if } d_{tk} \leq AB_L \quad \text{then } x_{7k} + x_{8k} + x_{17k} = 0 \quad (18)$$

6. اگر مجموع انرژی الکتریکی خروجی CHP به بار و باتری کمتر از p_{\min} باشد، سیستم CHP خاموش می‌شود رابطه (19).

$$\text{if } x_{3k} + x_{1k} \leq p_{\min} \quad \text{then } x_{3k} + x_{1k} + x_{2k} = 0 \quad (19)$$

7. اگر نیاز سرمایشی کمتر از ac_{\min} باشد، چیلر جذبی خاموش می‌شود رابطه (20).

$$\text{if } d_{ck} \leq ac_{\min} \quad \text{then } x_{19k} = 0 \quad (20)$$

8. بازده CHP، بویلر کمکی، چیلر جذبی و چیلر کمکی در نظر گرفته می‌شود روابط (21 تا 25).

$$x_{3k} + x_{1k} + x_{2k} + x_{16k} = \eta_p \times F_{chpk} \quad (21)$$

$$x_{4k} + x_{5k} + x_{13k} + x_{20k} = \eta_t \times F_{chpk} \quad (22)$$

$$x_{18k} = \eta_{ac} \times (x_{16k} + x_{15k} + x_{14k}) \quad (23)$$

$$x_{19k} = \eta_{ab} \times (x_{13k} + x_{8k} + x_{9k}) \quad (24)$$

$$(x_{7k} + x_{17k} + x_{8k}) = \eta_b \times F_{bk} \quad (25)$$

یکی از اهداف مهم این مدل آن است که تلفات گرمایی تا حد امکان کاهش داده شود. از طرفی، با افزایش نقش ذخیره‌کننده‌ها، ضمن افزایش قابلیت اطمینان تأمین انرژی، بر انعطاف سیستم در شرایط گوناگون بار شبکه افزوده شود. نیز فرض شده است که شرکت‌های برق آمادگی خرید برق بر اساس برنامه‌ریزی سیستم را دارند. تلفاتی که در سیستم رخ می‌دهد، با تعریف بازده برای بویلر، سیستم سرمایشی جذبی و کمکی، سیستم CHP و ضریب تلفات برای ذخیره انرژی لحاظ شده است. یکی از اهداف این سیستم آن است که این تلفات را کاهش دهد. از طرفی، سایر هزینه‌ها از قبیل هزینه تأسیس این امکانات، بهره‌برداری و تعمیرات با تبدیل آن برای یک روز کاری به صورت ثابت IPCC لحاظ شده است. از طرفی، چون بهینه‌سازی برای 24 ساعت انجام شده است، بعضی از پارامترها، ضرایب یا هزینه‌هایی که در روزهای متفاوت تغییر می‌کند، ثابت فرض شده‌اند.

جدول (1): مقادیر پارامترهای مورد نیاز مسئله

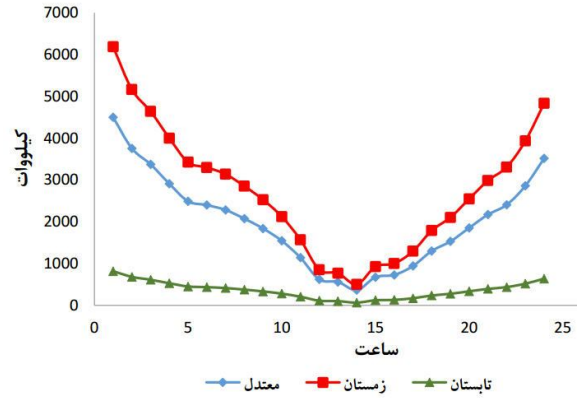
علائم	مقدار	علائم	مقدار	علائم	مقدار
pr_{fk}	10/65	δ_p	%98	R_{ip}	500
pr_{sp}	0/055	μ_h	0/001	AB_L	50
pr_{sh}	0/00473	μ_p	0/05	AB_H	3000
λ	0/95	R_{h1}	390	P_{min}	50
η_p	%33	R_{h2}	390	P_{max}	1200
η_t	%52	R_{p1}	200	h_{max}	1896
η_{ac}	%33/3	R_{p2}	200	h_{min}	78
η_{ab}	%95	$init_h$	200	c_{min}	20
η_b	%88	$init_p$	5	c_{max}	800
α_h	%95	Y_{0h}	150	ac_{min}	10
δ_h	%95	Y_{0p}	10	ac_{max}	700
α_p	%98	R_{th}	500	pr_c	0/005
LMC	5/5	Δt	1		

همان‌طور که از جدول (2) مشاهده می‌شود، با اضافه‌شدن سیستم CHP، هزینه بهره‌برداری حدود 1060/9 دلار کاهش می‌یابد. از طرفی با اضافه‌شدن باتری به سیستم فوق، 36/2 دلار دیگر از هزینه‌های بهره‌برداری کاسته شده است؛ زیرا با اضافه‌شدن باتری به سیستم همان‌طور که از شکل (6) پیداست، در ساعاتی که قیمت برق ارزان می‌باشد، برق در باتری ذخیره می‌شود و در ساعاتی که قیمت برق افزایش می‌یابد، گذر توان از باتری به سیستم تغییر می‌یابد؛ در نتیجه هزینه تمام‌شده کاهش یافته است.

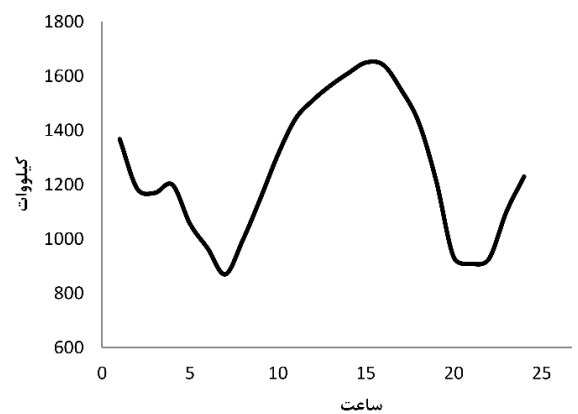
از طرفی، همان‌طور که از شکل (7) مشخص است، با افزودن سیستم CHP توان در خواستی از شبکه کاهش یافته و حتی در ساعاتی توان درخواستی صفر شده است. این کاهش توان علاوه بر اینکه بر کاهش هزینه‌ها اثر گذاشته، در صورت استفاده سیستم CHP در مقیاس وسیع‌تر، بر کاهش پیک شبکه نیز اثر خواهد گذاشت.

جدول (2): هزینه بهره‌برداری سیستم

نوع بهره‌برداری از سیستم	هزینه کل (دلار)
بدون سیستم CHP	4955/5
با سیستم CHP	3894/6
با سیستم CHP و باتری	3858/4

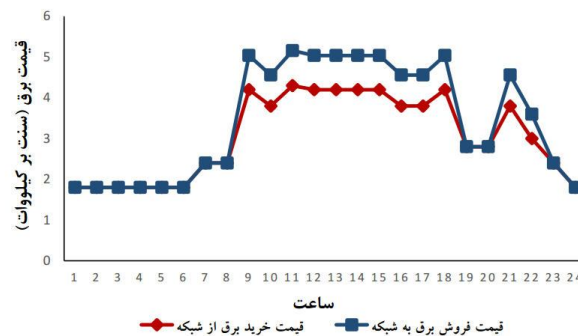


شکل (3): بار گرمایشی



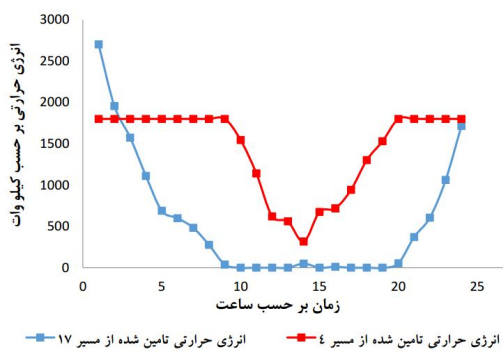
شکل (4): بار الکتریکی

این قیمت‌ها در شکل (5) آمده است [13]. فرض بر این است که بهره‌بردار سیستم قدرت (ISO) به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DR) و سیاست‌های تشویقی توجه می‌کند [2]؛ بنابراین، برق تولیدی CHP را بیست درصد بیشتر از قیمت فروش در ساعات‌های پیک می‌خرد. داده‌های مورد نیاز برای حل مسئله بهینه‌سازی در جدول (1) آمده است [4]. با توجه به اطلاعات فوق، تابع هدف بهره‌برداری سیستم مورد نظر با روش بهینه‌سازی خطی در نرم‌افزار GAMS اجرا شد که نتایج آن در جدول (2) ارائه شده است.

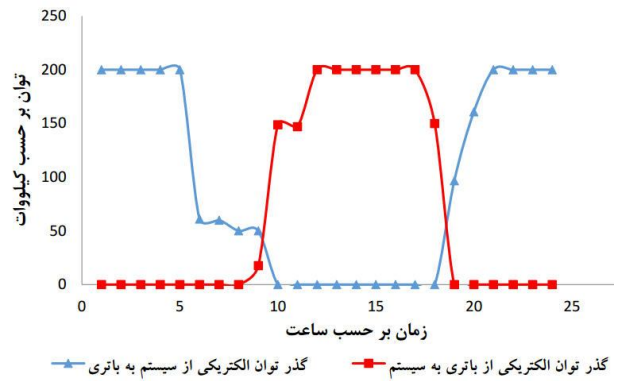


شکل (5): قیمت خرید و فروش برق از شبکه

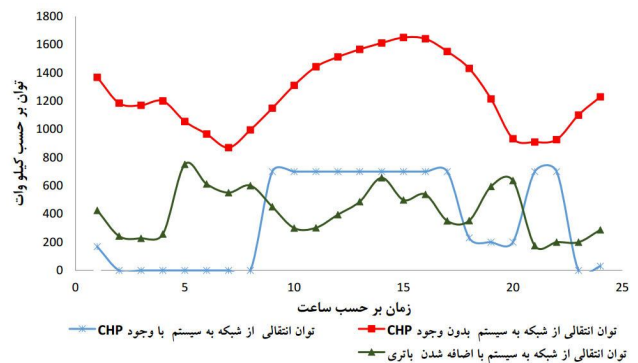
می‌شود. گذر انرژی حرارتی در سیستم پیشنهادی نیز با در نظر گرفتن سه حالت، سیستم بدون وجود CHP، با وجود CHP و با اضافه شدن ذخیره‌ساز انرژی حرارتی بررسی شده است. خاطرنشان می‌شود که ورود ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند. شکل (8) توان جاری شده به بار حرارتی را در حالتی که ذخیره‌ساز انرژی حرارتی در سیستم وجود ندارد، نشان می‌دهد. با توجه به شکل (7) مشخص است در حالتی که هیچ ذخیره‌ساز انرژی حرارتی در سیستم وجود نداشته است، انرژی جاری شده به بار حرارتی به وسیله سیستم CHP (مسیر 4)، در اکثر ساعات بیشتر از انرژی جاری شده به وسیله بویلر بوده است؛ همچنین در ساعاتی نیز بویلر توانی را به بار حرارتی منتقل نمی‌کند و تنها زمانی که CHP در حالت ماکزیمم تولید خود بوده و به تنهایی قادر به تأمین بار حرارتی نباشد، بویلر بقیه انرژی حرارتی مورد نیاز را تأمین می‌کند. علت این امر، همان‌طور که از قیود مسئله نیز مشخص است، آن است که بویلر به‌عنوان یک سیستم کمکی به سیستم مورد نظر افزوده شده است؛ لذا زمانی که CHP نتواند بار حرارتی را تأمین کند، بویلر کمکی باقی‌مانده انرژی را تأمین می‌کند. درواقع، عملکرد بویلر تابع نوع عملکرد CHP است. شکل‌های (9) و (10) اثر افزوده شدن ذخیره‌ساز انرژی حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزوده شدن ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، مقداری از بار حرارتی مورد نظر سیستم در حالت پیک حرارتی شبکه، توسط ذخیره‌ساز انرژی حرارتی تأمین شده است؛ در نتیجه، نحوه تولید CHP با تغییراتی مواجه شده است؛ از جمله اینکه در حالت پیک حرارتی، مقدار اندکی از توان حرارتی تولید شده توسط بویلر و CHP، با توجه به ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، کاسته می‌شود. این موضوع در شکل‌های (11) و (12) نشان داده شده است. خاطرنشان می‌گردد که مقداری از تغییرات فوق مربوط به اضافه شدن باتری نیز می‌باشد؛ زیرا با اضافه شدن باتری تولید حرارتی CHP نیز با تغییراتی مواجه می‌شود.



شکل (8): توان جاری شده به بار حرارتی بدون وجود ذخیره‌ساز



شکل (6): گذر توان در باتری

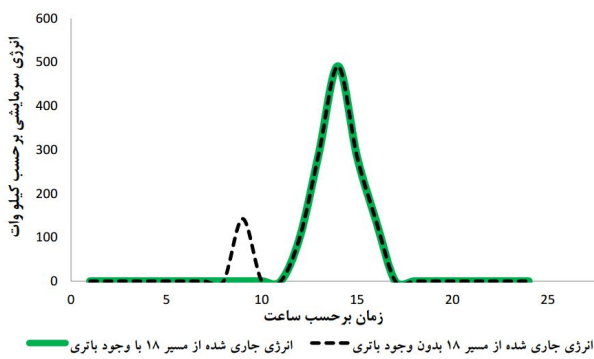


شکل (7): گذر توان الکتریکی از شبکه به سیستم

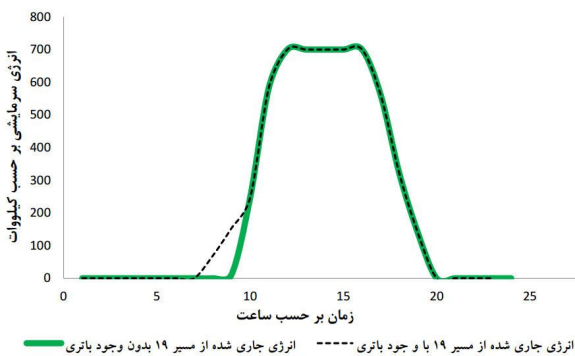
همچنین مشاهده می‌شود با افزوده شدن باتری به سیستم، توان درخواستی از شبکه در ساعات کم باری شبکه، که قیمت برق نیز کم می‌باشد، نسبت به حالت بدون باتری افزایش یافته و در ساعات پرباری شبکه، برق درخواستی از شبکه نسبت به حالت بدون باتری کاهش یافته است؛ زیرا در این حالت، سیستم مقداری از انرژی الکتریکی مورد نیاز را از انرژی ذخیره شده در باتری تأمین خواهد کرد؛ در نتیجه، منحنی بار در خواستی از شبکه یکنواخت‌تر شده است. هر چند استفاده از باتری در سیستم سبب کاهش توان درخواستی از شبکه و در نتیجه، کاهش هزینه بهره‌برداری از سیستم شده است، در نهایت با مقایسه سود حاصل شده با قیمت کنونی باتری‌ها و طول عمر آنها [12]، مشاهده می‌شود که کاهش هزینه اندک است و انتظار می‌رود با توسعه فناوری ساخت و کاهش قیمت باتری‌ها، تأثیرگذاری باتری‌ها بر هزینه سیستم بیشتر شود. خاطرنشان می‌گردد هزینه باتری شامل قیمت باتری و هزینه بهره‌برداری از باتری است که با توجه به اینکه در این مقاله هدف، بهره‌برداری بهینه از سیستم پیشنهادی می‌باشد، تنها هزینه بهره‌برداری از آن در نظر گرفته شده است. قیمت باتری در مسائل طراحی سیستم به عنوان هزینه نصب در نظر گرفته

شکل (12) نشان می‌دهد در حالتی که ذخیره‌ساز انرژی حرارتی به سیستم اضافه شده است، برخلاف حالت وجودنداشتن ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، بویلر در ساعات کم باری حرارتی سیستم نیز انرژی حرارتی تولید می‌کند؛ زیرا با توجه به شکل (10) این انرژی تولیدشده در ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، ذخیره و در ساعات پرباری از آن تخلیه می‌شود؛ اما با توجه به اینکه قیمت سوخت در طول بهره‌برداری از سیستم ثابت فرض شده، مقدار ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بسیار اندک است؛ در نتیجه، در صورت ثابت بودن قیمت سوخت، ذخیره‌ساز انرژی حرارتی با توجه به هزینه آن، اثر اندکی بر سیستم خواهد گذاشت.

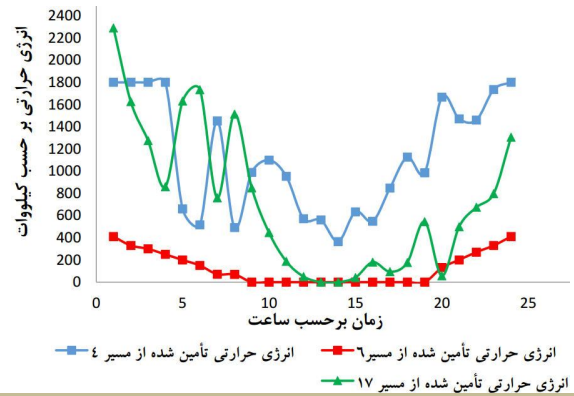
همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده است، بار سرمایشی سیستم نیز از طریق دو مسیر 18 و 19 تأمین می‌شود. شکل‌های (13) و (14) گذر انرژی در دو مسیر 18 و 19 را در حالت وجود و نبودن ذخیره‌سازهای انرژی، نشان می‌دهند. با توجه به دو شکل (13) و (14)، مشخص است اضافه‌شدن ذخیره‌ساز انرژی جز در یک ساعت خاص (ساعت 9)، تأثیری بر گذر توان از این دو مسیر ندارد؛ زیرا همان‌طور که از منحنی تقاضای بار مشخص است، پیک بار سرمایشی در ساعات کم باری حرارتی شبکه می‌باشد؛ در نتیجه، انرژی در حال ذخیره شدن در ذخیره‌ساز انرژی حرارتی است و توانی از ذخیره‌کننده



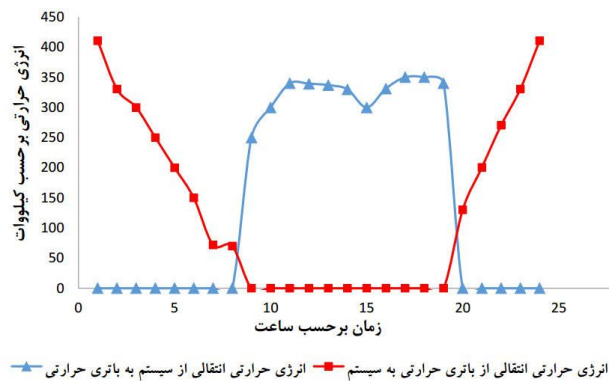
شکل 13: گذر انرژی از مسیر 18



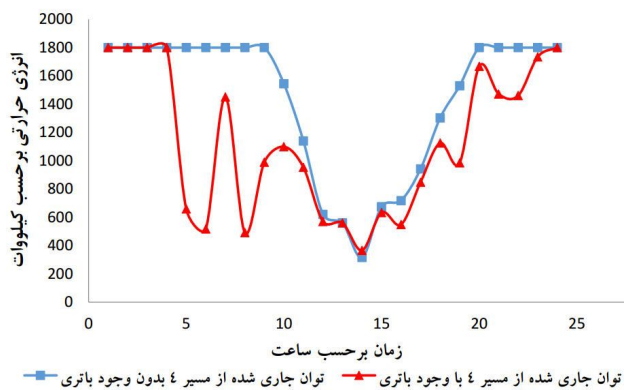
شکل 14: گذر انرژی از مسیر 19



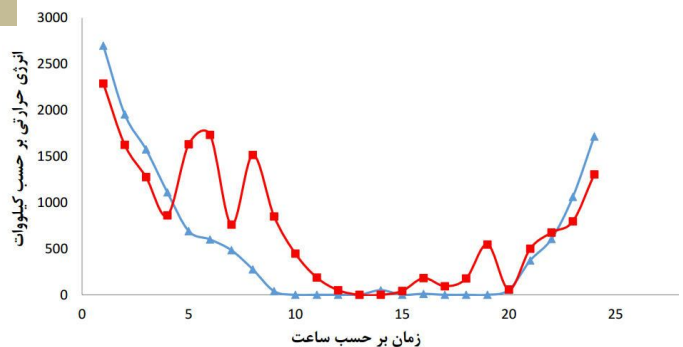
شکل (9): توان جاری شده به بار حرارتی با وجود ذخیره‌ساز انرژی



شکل (10): گذر توان در ذخیره‌ساز انرژی حرارتی



شکل (11): گذر توان از مسیر 4



شکل (12): گذر توان از مسیر 17

بیشتر از حالت قبل است؛ زیرا مجموع بار حرارتی و سرمایشی در این حالت، بیشتر از بار الکتریکی است و از طرفی، تنها راه تأمین بار حرارتی و بخش اعظم بار سرمایشی نیز از طریق بویلر و سیستم CHP می‌باشد که هر دو مصرف‌کننده سوخت هستند. همچنین مشاهده می‌شود اختلاف تغییر هزینه در سه حالت وجود یا نبودن سیستم CHP و باتری نسبت به هم، بسیار کم است؛ زیرا همان‌طور که بیان شد، تنها راه تأمین انرژی حرارتی در هر سه حالت، مصرف سوخت می‌باشد؛ در نتیجه، با توجه به مصرف سوخت در هر سه حالت، برای تأمین بار حرارتی، وجود یا نبودن سیستم CHP و باتری، تأثیر کمی بر افزایش هزینه‌های حاصل از افزایش قیمت سوخت دارد؛ لذا می‌توان گفت که انعطاف سیستم مورد نظر به تغییرات قیمت سوخت، نسبت به تغییرات قیمت برق، کمتر است.

شکل (17) اثر تغییرات قیمت باتری را بر هزینه بهره‌برداری نشان می‌دهد. خاطرنشان می‌گردد هزینه باتری شامل هزینه نصب و هزینه بهره‌برداری است. با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی در این مقاله، بهره‌برداری بهینه از سیستم می‌باشد، فقط هزینه بهره‌برداری از سیستم در نظر گرفته شده است. هزینه نصب باتری در مسائل طراحی مورد توجه است. هزینه بهره‌برداری از باتری نیز شامل هزینه شارژ و دشارژ باتری است. همان‌طوری که دیده می‌شود، با توجه به نبودن باتری در دو حالت عدم استفاده از سیستم CHP و استفاده از CHP، با افزایش هزینه باتری، هزینه بهره‌برداری از سیستم تغییری نکرده است. از طرفی، افزایش پنج درصدی در هزینه بهره‌برداری باتری، سبب افزایش

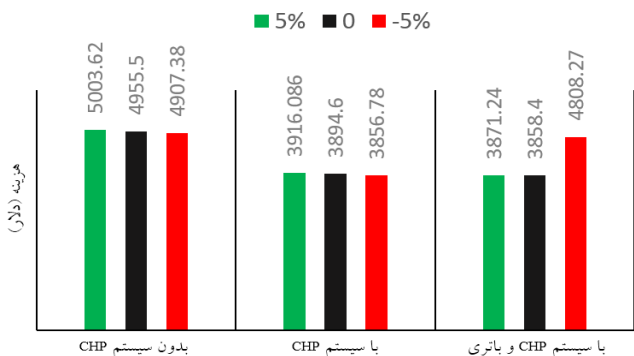
به سمت بار سرمایی گسیل نمی‌شود؛ در نتیجه، این ذخیره‌سازها تأثیری بر گذر انرژی سرمایشی در مسیرهای 18 و 19 ندارند و تنها در یک ساعت خاص در این سیستم، با توجه به بار سرمایشی، بر سیستم اثرگذار بوده است.

در ادامه، اثر تغییرات قیمت برق، سوخت و هزینه بهره‌برداری باتری بر نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (15)، (16) و (17) نتایج این مطالعات را نشان می‌دهد. تغییرات قیمت به اندازه $\pm 5\%$ قیمت پایه در نظر گرفته شده است.

شکل (15) نشان می‌دهد که با افزایش قیمت بر قدر سه حالت بدون سیستم CHP، وجود سیستم CHP، وجود سیستم CHP و باتری، میزان افزایش هزینه بهره‌برداری به ترتیب برابر $0/97\%$ ، $0/55\%$ و $0/33\%$ است. مشاهده می‌شود که با افزایش پنج درصدی قیمت برق، در حالت وجودداشتن سیستم CHP، میزان افزایش هزینه بهره‌برداری برابر $0/97\%$ می‌باشد که این میزان کمتر از پنج درصد است. این رشد کم هزینه بهره‌برداری در مقابل افزایش قیمت برق، به این دلیل است که در این حالت، همه بارهای الکتریکی، حرارتی و سرمایشی توسط برق تأمین نمی‌شود، بلکه تنها بار الکتریکی و بخشی از بار سرمایشی توسط انرژی الکتریکی تأمین می‌شود و بار حرارتی توسط بویلر تأمین می‌شود. با توجه به اینکه در این حالت فرض شده است که تنها قیمت برق افزایش یافته و قیمت سوخت ثابت در نظر گرفته شده است، میزان افزایش هزینه بهره‌برداری کمتر از پنج درصد شده است.

همچنین دیده می‌شود با اضافه شدن سیستم CHP به سیستم، میزان افزایش هزینه‌ها نسبت به حالت قبلی (بدون سیستم CHP) کمتر است؛ زیرا با وجود سیستم CHP بخشی از بار الکتریکی مورد نیاز از طریق سیستم CHP تأمین می‌شود. با توجه به ثابت بودن قیمت سوخت، میزان افزایش هزینه بهره‌برداری نسبت به حالت قبل کمتر است. با اضافه شدن باتری به سیستم، با توجه به امکان ذخیره‌سازی انرژی، مشاهده می‌شود که میزان افزایش هزینه کمتر شده است؛ در نتیجه، می‌توان گفت با وجود سیستم CHP و باتری در سیستم، میزان انعطاف سیستم در مقابل تغییرات قیمت برق بیشتر خواهد شد.

شکل (16) تغییرات هزینه بهره‌برداری را به‌ازای تغییرات پنج درصدی قیمت سوخت نشان می‌دهد. در این حالت، میزان افزایش هزینه بهره‌برداری در سه حالت به ترتیب برابر $4/02\%$ ، $3/84\%$ و $2/54\%$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که در این حالت، میزان افزایش هزینه‌ها

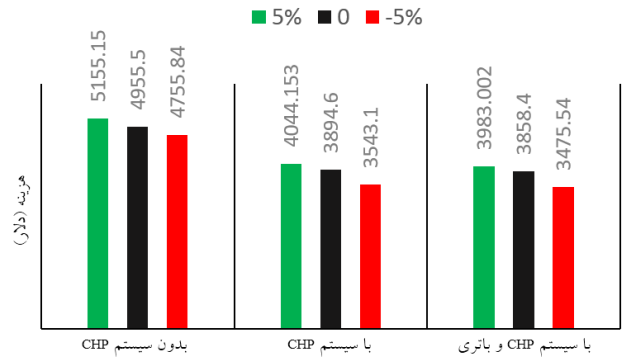


شکل (15): نمودار تغییرات هزینه بهره‌برداری به تغییرات $\pm 5\%$ درصدی قیمت برق

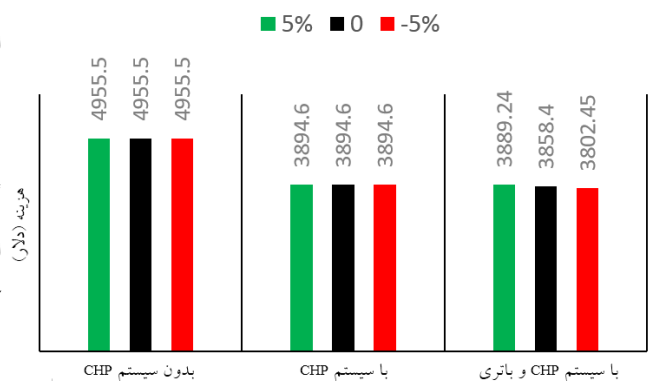
همان‌طور که از جدول (3) مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش مجموع بار الکتریکی، سرمایشی و گرمایشی، در تمامی حالات، هزینه بهره‌برداری نسبت به روز معتدل افزایش یافته است. این افزایش هزینه به علت افزایش بار سرمایشی اتفاق افتاده است. با اضافه شدن سیستم CHP، هزینه بهره‌برداری حدود 1194/6 دلار کاهش می‌یابد. از طرفی، با اضافه شدن باتری به سیستم فوق، 129/8 دلار دیگر از هزینه‌های بهره‌برداری کاسته شده است. با مقایسه میزان کاهش هزینه بهره‌برداری در این حالت نسبت به روز معتدل، مشخص می‌شود میزان کاهش هزینه در بار تابستانی (25/38%) بیشتر از میزان کاهش هزینه در بار معتدل (22/13%) است؛ زیرا با افزایش بار سرمایشی و کاهش بار گرمایشی در تابستان، میزان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساعات کم باری حرارتی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه استفاده از ذخیره‌کننده انرژی حرارتی جهت تأمین بار سرمایشی بیشتر می‌شود. این موضوع در شکل‌های (18) و (19) نشان داده شده است. همچنین با افزایش مجموع بار سرمایشی و گرمایشی، میزان بهره‌گیری از سیستم CHP جهت تأمین این بارها افزایش یافته و در نتیجه به علت تأمین بارها از مسیر ارزان‌تر، میزان کاهش هزینه‌ها نسبت به روز معتدل بیشتر شده است.

4.3. حالت سوم: بار زمستانی

در این حالت، بار سرمایشی و گرمایشی مطابق با شکل‌های (2) و (3) برای روز زمستانی در نظر گرفته شده است؛ بار الکتریکی نیز مطابق با شکل (4) است. نتایج بهره‌برداری بهینه، با در نظر گرفتن سه حالت سیستم بدون حضور CHP، با حضور CHP، و با حضور هم‌زمان CHP و ذخیره‌کننده انرژی گرمایشی و الکتریکی، در جدول (4) ارائه شده است. همان‌طور که از جدول (4) برمی‌آید، هزینه بهره‌برداری در همه حالات، به شدت افزایش یافته است. این افزایش هزینه به علت افزایش بار، ناشی از افزایش بار گرمایشی در زمستان، به وجود آمده است. در این حالت، با ورود سیستم CHP، هزینه بهره‌برداری 2162/7 دلار کاهش یافته است. از طرفی، با ورود باتری، هزینه بهره‌برداری



شکل (16): نمودار تغییرات هزینه بهره‌برداری به تغییرات ± 5 درصدی قیمت سوخت



شکل (17): نمودار تغییرات هزینه بهره‌برداری به تغییرات ± 5 درصدی هزینه بهره‌برداری از باتری

0/7 درصدی در هزینه بهره‌برداری از سیستم شده است. این افزایش اندک هزینه نسبت به دو حالت قبل، با توجه به هزینه اندک شارژ و دشارژ باتری، طبیعی به نظر می‌رسد. خاطرنشان می‌گردد که بخش عمده هزینه باتری، قیمت باتری می‌باشد [12] که مقدار آن بسیار بالا است؛ در حالی که هزینه بهره‌برداری از باتری بسیار پایین است؛ در نتیجه، می‌توان گفت سیستم مورد بررسی در مقابل تغییرات هزینه بهره‌برداری از باتری بسیار منعطف است.

4.2. حالت دوم: روز تابستانی

در این حالت، بار سرمایشی و گرمایشی مطابق با شکل‌های (2) و (3) برای روز تابستانی در نظر گرفته شده‌اند؛ بار الکتریکی نیز مطابق با شکل (4) است. نتایج بهره‌برداری بهینه، با در نظر گرفتن سه حالت سیستم بدون حضور CHP، با حضور CHP، و با حضور هم‌زمان CHP و ذخیره‌کننده انرژی گرمایشی و الکتریکی، در جدول (3) ارائه شده است.

جدول (3): هزینه بهره‌برداری از سیستم

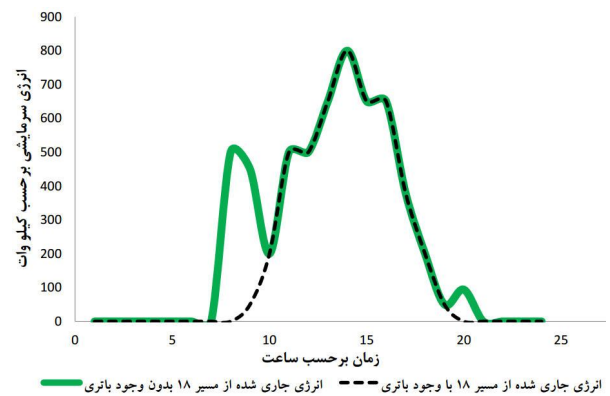
نوع بهره‌برداری از سیستم	هزینه کل (دلار)
بدون سیستم CHP	5137
با سیستم CHP	3942/4
با سیستم CHP و باتری	3812/6

5. نتیجه‌گیری

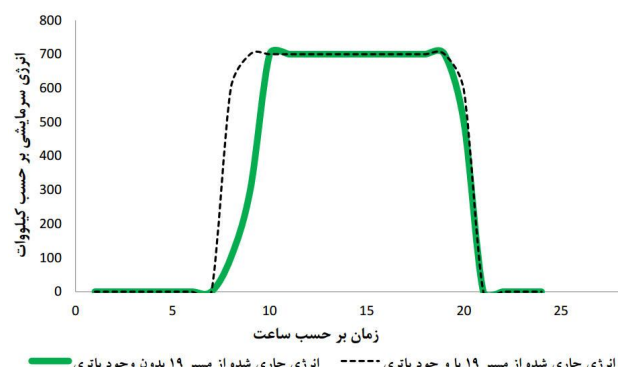
با افزوده شدن باتری به سیستم پیشنهادشده در این مقاله، بر انعطاف سیستم در شرایط گوناگون بار الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی افزوده شده است؛ به طوری که در همه شرایط، از یک طرف بار درخواستی از شبکه کاسته شده و از طرف دیگر، هزینه‌های پرداختی برای انرژی نیز کاهش یافته است. با اضافه شدن ذخیره سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی به سیستم فوق، امکان ذخیره‌سازی انرژی در ساعات کم باری الکتریکی و حرارتی و استفاده از این انرژی در ساعات پر باری، به وجود آمده است؛ در نتیجه، با توجه به افزایش قیمت برق در ساعات پر باری، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی اثر قابل توجهی بر سیستم گذاشته و منحنی بار درخواستی از شبکه، شکل یکنواخت‌تری گرفته است؛ اما با توجه به اینکه قیمت سوخت در طول روز ثابت فرض شده، اثرگذاری ذخیره‌ساز انرژی حرارتی بسیار کم است. همچنین در روز معتدل، با توجه به اینکه بار سرمایشی در روز مورد بررسی، نسبت به بارهای الکتریکی و حرارتی، کمتر بوده و پیک آن در ساعات کم باری حرارتی شبکه است، ذخیره‌ساز انرژی حرارتی تأثیری بر گذر انرژی سرمایشی نداشته است. با زیاد شدن بار سرمایشی یا گرمایشی در روزهای تابستانی و زمستانی، نسبت به روز معتدل، اثر سیستم CHP بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری بیشتر شده است؛ زیرا با افزایش انرژی گرمایشی یا سرمایشی، میزان بهره‌گیری از CHP افزایش یافته و در نتیجه، درصد کاهش هزینه بهره‌برداری بیشتر شده است. همچنین نتایج مطالعات نشان می‌دهد که سیستم مورد نظر در مقابل تغییرات قیمت برق، با توجه به اینکه امکان تأمین بار الکتریکی از دو طریق شبکه و سیستم CHP وجود دارد، بسیار منعطف است؛ اما با توجه به اینکه بار حرارتی تنها با مصرف سوخت تأمین می‌شود، انعطاف سیستم مورد نظر در مقابل تغییرات قیمت سوخت نسبت به تغییرات قیمت برق کمتر است.

فهرست علائم

- pr_{nk} : قیمت خرید برق از شبکه (Cent.kW.h^{-1})
- pr_{fk} : قیمت سوخت (Cent.kW.h^{-1})
- x_{ik} : مقدار توان عبوری از مسیر i ام سیستم (kW)
- pr_{sp} : هزینه شارژ و دشارژ باتری (Cent.kW.h^{-1})
- pr_{sh} : هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده گرمایی (Cent.kWh^{-1})
- pr_c : هزینه تولید سرما توسط سیستم جذبی (Cent.kWh^{-1})



شکل (18): گذر انرژی از مسیر 18



شکل (19): گذر انرژی از مسیر 19

جدول (4): هزینه بهره‌برداری از سیستم

نوع بهره‌برداری از سیستم	هزینه کل (دلار)
بدون سیستم CHP	8205/4
با سیستم CHP	6042/7
با سیستم CHP و باتری	5940/3

102/4 دلار دیگر کاهش یافته است. میزان کاهش هزینه بهره‌برداری در این حالت، برابر 27/6% است. این میزان کاهش از دو حالت قبلی بیشتر است؛ زیرا با افزایش بار گرمایشی، امکان استفاده از انرژی حرارتی تولیدشده توسط سیستم CHP، در محدوده ظرفیت حرارتی تولیدی آن، بیشتر می‌شود و در نتیجه، با توجه به تأمین بار از مسیر ارزان‌تر، هزینه بهره‌برداری نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش بار حرارتی و با توجه به ثابت ماندن بار الکتریکی، میزان ذخیره انرژی در باتری، در ساعات کم باری و استفاده از آن در ساعات پر باری، نسبت به روز معتدل نیز افزایش یافته است؛ این نیز به نوبه خود بر کاهش هزینه بهره‌برداری مؤثر بوده است.

Δt : تغییرات زمان بر حسب ساعت
 sto_{hk} : انرژی حرارتی ذخیره شده تا ساعت k , (kWh)
 $init_h$: گرمای ابتدایی ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی، (kWh)
 μ_h : ضریب تلفات سیستم ذخیره کننده گرمایی
 sto_{pk} : انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری تا زمان k , (kWh)
 $init_p$: توان ابتدایی ذخیره شده در باتری، (kWh)
 μ_p : ضریب تلفات باتری
 Y_{0h} : حداقل گرمای ذخیره شده در ذخیره کننده گرمایی، (kWh)
 R_{th} : مقدار نامی سیستم ذخیره کننده انرژی، (kWh)
 Y_{0p} : حداقل انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری، (kWh)
 R_{tp} : مقدار نامی باتری، (kWh)
 AB_L : حداقل حرارت تولید شده توسط بویلر، (kWh)
 AB_H : حداکثر حرارت تولید شده توسط بویلر، (kWh)
 P_{min} : حداقل انرژی الکتریکی تولید شده توسط (CHP)، (kWh)
 P_{max} : حداکثر انرژی الکتریکی تولید شده توسط (CHP)، (kWh)
 h_{min} : حداقل حرارت تولید شده توسط (CHP)، (kWh)
 h_{max} : ماکزیمم حرارت تولید شده توسط (CHP)، (kWh)
 c_{min} : حداقل سرمای تولید شده توسط چیلر کمکی
 c_{max} : ماکزیمم سرمای تولید شده توسط چیلر کمکی
 ac_{min} : حداقل سرمای تولید شده توسط چیلر جذبی
 ac_{max} : حداکثر سرمای تولید شده توسط چیلر جذبی

LMC : هزینه مدیریت بار (Cent.kW.h^{-1})
 pr_{sk} : قیمت فروش برق به شبکه (Cent.kW.h^{-1})
 λ : بازده الکتریکی انتقال برق از مسیر 5
 $IPCC$: کل هزینه های داخلی (CHP)، (Cent)
 d_{pk} : تقاضای انرژی الکتریکی در ساعت k , (kW)
 d_{tk} : تقاضای انرژی حرارتی در ساعت k , (kW)
 d_{ek} : تقاضای انرژی سرمایشی در ساعت k , (kW)
 η_p : بازده الکتریکی (CHP)
 F_{chpk} : سوخت مصرفی (CHP) در زمان k , (kWh)
 F_{bk} : سوخت مصرفی بویلر کمکی در زمان k , (kWh)
 η_t : بازده حرارتی (CHP)
 η_{ac} : بازده چیلر کمکی
 η_{ab} : بازده چیلر جذبی
 η_b : بازده بویلر
 α_h : ضریب شارژ سیستم ذخیره کننده گرمایی
 R_{h1} : نسبت شارژ گرما (kWh)
 δ_h : ضریب دشارژ سیستم ذخیره کننده گرمایی
 R_{h2} : نسبت دشارژ گرما (kWh)
 α_p : ضریب شارژ باتری
 R_{p1} : نسبت شارژ انرژی الکتریکی (kWh)
 δ_p : ضریب دشارژ باتری
 R_{p2} : نسبت دشارژ انرژی الکتریکی (kWh)

مراجع

- [1] شاهیده پور، محمد، «عملیات بازار در سیستم های الکتریکی قدرت»، ترجمه سیفی، حسین، ویرایش اول، دانشگاه تربیت مدرس، 1384.
- [2] Moradi, H., Moghaddam, I.G., Moghaddam, M.P., Haghifam, M.-R., "Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions For a Cogeneration Plant", IEEE International Energy Conference and Exhibition (Energy Con), pp.785-790, 18-22 Dec. 2010.
- [3] El-Khattam, W., Salama, M., "Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits", Electric Power Systems Research, Vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [4] Coles, L., Beck, R., "Distributed Generation Can Provide an Appropriate Customer Price Response to Help Fix Wholesale Price Volatility", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.1, pp.141-143, 2001.
- [5] Hashemi, R., "A Developed Offline Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, pp. 222-229, 2009.
- [6] Einhorn, F., Conte, V., Kral, C., Fleig, J. "A Method for Online Capacity Estimation of Lithium Ion Battery Cells Using the State of Charge and the Transferred Charge", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, pp. 736-741, 2012
- [7] Roscher, M. A., Assfalg, J., Bohlen, O. S., "Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, pp. 98-103, 2011.

- [8] Bo Geng, Mills, J.K., Dong, S., "Two-Stage Energy Management Control of Fuel Cell Plug-In Hybrid Electric Vehicles Considering Fuel Cell Longevity", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 61, pp. 498-508, 2012.
- [9] Ellis, M. W., Von Spakovsky, M. R., Nelson, D. J. , "Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, pp. 1808-1818, 2001.
- [10] U.S. Department of Energy, "The Market and Technical Potential for Combined Heat and Power in the Commercial/Institutional Sector ", Version 1.0, Washington, DC 2007.
- [11] Zobler, N., Hatcher, K., "Choosing the Right Financing For Your Energy Efficiency and Green Projects With ENERGY STAR®", pp. 51, 2009.
- [12] www.batteryworld.co.za/battery_prices.
- [13] Aalami, H.A., Moghaddam, M. P., Yousefi, G. R., "Demand Response Modeling considering Interruptible/Curtailable Loads and Capacity Market Programs", Applied Energy, Vol. 87, pp. 243-250, 2010.