



### مدلسازی مشترکین AMI در

### مدیریت بهینه خاموشی برپایه الگوی مصرفی

مجتبی پاکخصال سیدمحمد تقی بطحائی  
دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
جمهوری اسلامی ایران

واژه‌های کلیدی: مدیریت خاموشی، الگوی مصرف، AMI

#### چکیده

این مقاله به ارائه مدلی برای مدیریت خاموشی پرداخته است. ابتدا مهمترین مکانیزمهای مدیریت بار مرور گشته و نمونه‌هایی از تجربه شرکت‌های توزیع برای تبیین بیشتر آمده است. در ادامه اجرای سیستم AMI بعنوان زیرساخت لازم برای اجرای مدیریت بار بررسی میشود و یک ساختار نرم افزاری برای کنسول مرکزی جهت اجرای مدیریت مانور خاموشی پیشنهاد می‌گردد.

بخش مدلسازی به ارائه فرمولاسیون و تعریف تابع هدف سیستم مدیریت خاموشی و ارائه معیارهای کمی همچون معیار شایستگی الگوی مصرف می‌پردازد بهینه‌سازی تابع هدف دارای سه سیاست اصلی است: ۱- به حداقل رساندن تعداد مشترکین خاموش ۲- حداکثر شدن سود شرکت توزیع ۳- ترغیب مشترک به انتقال بار در ساعات کم بار. در پایان با توجه به تعداد بالای مجموعه‌های جواب ممکن روش برنامه‌ریزی خطی باینری برای حل مسئله بهینه‌سازی در یک مورد نمونه استفاده شده است.



### توزیع بهینه یکپارچه در سیستم‌های انرژی چند حامی با حضور عنصر ذخیره‌کننده

ابوالفضل قاسمی محمدحسین جاویدی  
استاد گروه برق  
b-javid@ferdowsi.um.ac.ir

دانشجوی ارشد برق - قدرت  
abolfrazi.ghtesmi@stu-mail.um.ac.ir

مهدی ظریف مهدی صمدی  
دانشجوی دکتری برق - قدرت  
Ma\_zn722@stu-mail.um.ac.ir

دانشجوی دکتری برق - قدرت  
md\_samadi@gmail.com

آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار  
دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداري یکپارچه، هاب انرژی، توزیع بهینه، شبکه انرژی چندبرداري

#### چکیده

یکی از پیشنهادات ارائه شده برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداري سیستم‌های انرژی در آینده استفاده از سیستم‌های انرژی چند حامی به صورت یکپارچه می‌باشد. در این سیستم‌ها انرژی‌های مختلف می‌توانند با یکدیگر همکاری داشته باشند. منظور از همکاری بین انرژی‌ها، امکان تبدیل آنها به فرم‌های دیگر و یا ذخیره‌سازی می‌باشد. این همکاری بین انرژی‌ها از طریق واحدی بنام هاب انرژی صورت می‌گیرد. استفاده از این واحد، قابلیت مدیریت و بهینه‌سازی در سیستم‌های انرژی را افزایش می‌دهد. با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی در سیستم‌های انرژی، این مقاله به توزیع بهینه انرژی با در نظر گرفتن تجهیز ذخیره‌کننده به عنوان یکی از عناصر هاب انرژی پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی آن بر روی یک هاب نمونه ارائه شده است.

## توزیع بهینه یکپارچه در سیستم‌های انرژی چند حاملی با حضور عنصر ذخیره کننده

مهدی ظریف دانشجوی دکتری برق - قدرت Ma_z722@stu-ail.um.ac.ir	مهدی صمدی دانشجوی دکتری برق - قدرت md.samadi@gmail.com	محمدحسین جاویدی استاد گروه برق h-javidi@ferdowsi.um.ac.ir	ابوالفضل قاسمی دانشجوی ارشد برق - قدرت abolfazl.ghasemi@stu-mail.um.ac.ir
---	--	---	---

آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری یکپارچه، هاب انرژی، توزیع بهینه، شبکه انرژی چندبرداری

### چکیده

یکی از پیشنهادات ارائه شده برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های انرژی در آینده استفاده از سیستم‌های انرژی چند حاملی به صورت یکپارچه می‌باشد. در این سیستم‌ها انرژی‌های مختلف می‌توانند با یکدیگر همکاری داشته باشند. منظور از همکاری بین انرژی‌ها، امکان تبدیل آنها به فرم‌های دیگر و یا ذخیره‌سازی می‌باشد. این همکاری بین انرژی‌ها از طریق واحدی بنام هاب انرژی صورت می‌گیرد. استفاده از این واحد، قابلیت مدیریت و بهینه‌سازی در سیستم‌های انرژی را افزایش می‌دهد. با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی در سیستم‌های انرژی، این مقاله به توزیع بهینه انرژی با در نظر گرفتن تجهیز ذخیره‌کننده به عنوان یکی از عناصر هاب انرژی پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی آن بر روی یک هاب نمونه ارائه شده است.

### ۱- مقدمه

در طول دهه گذشته، صنعت تولید انرژی اکثر کشورهای توسعه‌یافته دو پیشرفت مهم را تجربه کرده است:

- تجدیدساختار و تبدیل چارچوب انحصاری به ساختار رقابتی مبتنی بر بازار آزاد
- افزایش استفاده از منابع انرژی پراکنده کوچک برای تولید برق و حرارت.

در همین زمان نیروگاه‌ها با مسایل مهمی همچون افزایش دائم تقاضای انرژی و اعتماد به زیرساخت‌های فرسوده و متراکم موجود (که جایگزینی آنها مشکل و یا پرهزینه است) روبرو بوده‌اند[۱].

یک راه برای استفاده هرچه موثرتر از زیرساخت‌های موجود، در نظر گرفتن یک سیستم یکپارچه انرژی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری است. اگر زیرساخت‌ها بخوبی یکپارچه‌سازی شوند؛ یعنی انرژی میان آنها بتواند بخوبی مبادله شود، می‌توان از مزایای این بهره‌برداری، برخوردار شد. برای تحلیل یکپارچه سیستم‌های انرژی که معمولاً، سیستم با حامل‌های متعدد انرژی<sup>۱</sup> یا سیستم چندحاملی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند[۲]، ابزارهای مختلفی توسعه یافته که بر پایه مفهوم

<sup>1</sup> Multiple energy carrier systems

<sup>2</sup> Multi-carrier systems

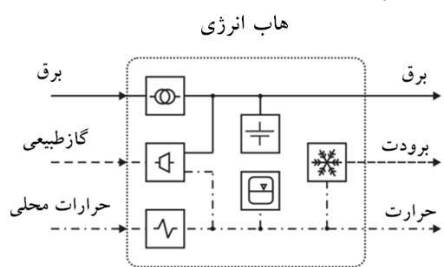
## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

حارثت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب سیستم‌ها و همکاری میان انرژی‌های مختلف، با استفاده از مزیت‌های خاص هر یک از آنها، می‌تواند نتایج مطلوبی را در پی داشته باشد. برای مثال برق می‌تواند در مسیرهای طولانی با تلفات تقریباً کمی منتقل شود. انرژی شیمیایی از قبیل گاز طبیعی می‌تواند با تکنولوژی‌های ساده و ارزان ذخیره شود. محققان عقیده دارند که همکاری میان حامل‌های مختلف انرژی می‌تواند نقش مثبتی در بهبود شبکه ایفا کند.

با این توضیحات در نظر گرفتن مفهوم یک واحد یکپارچه که در آن تبدیل، انتقال و ذخیره فرم‌های مختلف انرژی صورت می‌گیرد، امری منطقی است. این واحد اصطلاحاً هاب انرژی نامیده می‌شود. [۴]

هاب انرژی یک سیستم کلی برای انتقال، تبدیل و ذخیره انرژی‌های مختلف است که یک واسطه بین تامین‌کننده، مصرف‌کننده و زیرساخت‌های انتقال انرژی می‌باشد و می‌تواند برای بهینه‌سازی در بهره‌برداری از شبکه انرژی چندبرداری مورد استفاده قرار بگیرد. [۶]

شکل (۱) نمونه ساده‌ای از یک هاب انرژی را نشان می‌دهد. یک هاب انرژی وظیفه تبادل انرژی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را بر عهده دارد.



شکل (۱) - یک نمونه ساده از هاب انرژی

### ۳- مدل‌سازی

همانطور که در بخش قبل بیان شد، هاب انرژی می‌تواند برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از شبکه‌های انرژی چندبرداری مورد استفاده قرار بگیرد. قدم اول برای انجام این کار، مدل‌سازی مناسب هاب انرژی است. ابتدا روابط بین اجزای تشکیل‌دهنده هاب بصورت ریاضی بیان می‌شود. هاب انرژی شامل سه عنصر اصلی می‌باشد [۷]:

هاب انرژی<sup>۱</sup> هستند. هاب انرژی بعنوان واحدی در نظر گرفته شده است که حامل‌های مختلف انرژی در آن تبدیل، ذخیره و منتقل می‌شوند. در سال‌های اخیر فعالیت‌های متنوعی در این زمینه صورت گرفته است.

مرجع [۳] با توجه به نیاز انرژی در آینده و زیرساخت‌های موجود، به موضوع همکاری بین انرژی‌ها و توصیف یکپارچه شبکه‌های انرژی در آینده می‌پردازد. در مرجع [۴] پخش بار بهینه در سیستم انرژی، که در آن حامل‌های متعدد انرژی حضور دارند، با در نظر گرفتن قيود شبکه، بصورت یکپارچه مورد تحلیل قرار گرفته است.

مرجع [۵] بهینه‌سازی تزویج هاب انرژی برای برنامه‌ریزی احداث هاب را مورد توجه قرار داده است. مرجع [۶] با در نظر گرفتن انرژی‌های نو در شبکه‌های یکپارچه انرژی و استفاده از مفهوم هاب انرژی، روابط حاکم بر سیستم را بطور کامل بسط داده است.

هدف این مقاله شبیه‌سازی توزیع بهینه انرژی در سمت ورودی هاب، در پریودهای مختلف است. در این روند با در نظر گرفتن عنصر ذخیره‌کننده، میزان بهینه انرژی ذخیره شده در هاب نیز بدست می‌آید. در ادامه و در بخش (۲) مقاله، مفهوم هاب انرژی و علت استفاده از این مفهوم توضیح داده شده است. در بخش (۳) به مدل‌سازی و بیان روابط ریاضی پرداخته شده است. در بخش (۴) فرمول‌بندی توزیع بهینه انرژی بصورت یک مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است. بخش (۵) به معرفی هاب نمونه مورد مطالعه پرداخته و در بخش (۶)، نتایج شبیه‌سازی ارائه و تجزیه و تحلیل شده است.

### ۲- مفهوم هاب انرژی

نیاز مصرف‌کنندگان صنعتی، تجاری و خانگی به فرم‌های مختلف انرژی توسط زیرساخت‌های مختلفی تأمین می‌گردد. بطور نمونه در بخش صنعتی ذغال‌سنگ، فرآورده‌های نفتی، بیوماس و انرژی‌های مقید به شبکه مانند برق، گاز طبیعی و

<sup>۱</sup> Energy hub

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

خروجی‌های  $(L_\alpha, L_\beta, \dots, L_\omega)$  در حالت ماندگار را بترتیب با بردارهای  $P$  و  $L$  نشان دهیم؛ رابطه بین ورودی و خروجی در چنین مبدلی را می‌توان بصورت رابطه ماتریسی (۳) نمایش داد [۸]:

$$\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \dots & c_{\omega\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \dots & c_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\omega} & c_{\beta\omega} & \dots & c_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه (۳) ماتریس  $C$  ماتریس تزویج مبدل است. بایستی توجه داشت که در عمل تبدیل انرژی، هیچ انرژی به سیستم افزوده نمی‌شود. لذا تمامی سطرهای ماتریس تزویج، توسط رابطه (۴) محدود می‌شوند.

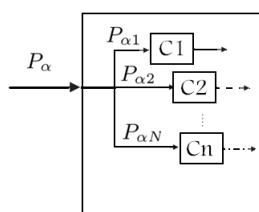
$$0 \leq c_{\alpha\beta} \leq 1 \quad \forall \alpha, \beta \quad (4)$$

همچنین مجموع تمام انرژی‌های خروجی حاصل از تبدیل یک نوع انرژی، کوچکتر و یا برابر میزان انرژی ورودی است.

$$0 \leq \sum_{\beta \in \mathcal{E}} c_{\alpha\beta} \leq 1 \quad \forall \alpha, \beta \quad (5)$$

## ۳-۱) منشعب شدن یک ورودی به چند مبدل

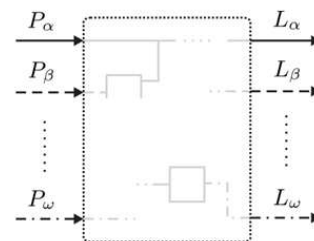
انرژی ورودی مربوط به یک حامل انرژی، ممکن است بین چندین مبدل تقسیم شود. در اینصورت برای تحلیل سیستم در قسمت ورودی، می‌توان به دو صورت عمل کرد. راه اول این است که هر انشعاب را به عنوان یک ورودی برای سیستم در نظر گرفت و مسئله را تحلیل نمود. راه دیگر آن است که در نقطه انشعاب یک ضریب بنام ضریب توزیع تعریف کرد که چگونگی توزیع انرژی یک حامل در سمت ورودی بین مبدل‌ها را مشخص کند [۴]. در شکل (۳) این مفهوم نشان داده شده است.



شکل (۳) - نقطه انشعاب ورودی

اتصال مستقیم<sup>۱</sup> (بعنوان مثال کابل‌های الکتریکی و خط لوله)، مبدل<sup>۲</sup> (مانند توربین گازی که فرم انرژی را تغییر می‌دهد و یا ترانسفورمرها و یکسوسازها که مقدار و (یا) کیفیت مطلوب برای تغذیه بارها را فراهم می‌کنند) و ذخیره‌کننده.

مبدل‌های انرژی با توجه به تعداد ورودی و خروجی به چهار دسته تقسیم می‌شوند. تک ورودی تک خروجی. تک ورودی چند خروجی، چند ورودی تک خروجی، چند ورودی چند خروجی. شکل (۲) یک مبدل با چند ورودی و چند خروجی را نشان می‌دهد.



شکل (۲) - مبدل انرژی با چند ورودی و چند خروجی

فرض می‌شود در یک مبدل تک ورودی و تک خروجی، حامل انرژی  $\alpha$  در ورودی، به انرژی  $\beta$  در سمت خروجی تبدیل شود. یک مدل کلی برای این عنصر می‌تواند از روی رابطه ورودی و خروجی تشکیل شود. در واقعیت جریان‌های ورودی و خروجی از هم مستقل نیستند و انرژی‌ها به هم وابستگی دارند. در حالت ماندگار رابطه بین ورودی و خروجی بصورت رابطه (۱) است.

$$L_\beta = c_{\alpha\beta} P_\alpha \quad (1)$$

در این رابطه،  $c_{\alpha\beta}$  ضریب توزیع است که میزان تزویج بین ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. در حالت تک‌ورودی و تک‌خروجی می‌توان از آن بعنوان راندمان مبدل تعبیر نمود. برای یک مبدل رابطه (۲) همواره برقرار است.

$$L_\beta \leq P_\alpha \rightarrow 0 \leq c_{\alpha\beta} \leq 1 \quad (2)$$

با تعمیم مسئله می‌توان مبدل چندورودی-چندخروجی را بصورت ترکیبی از مبدل‌های تک‌ورودی-تک‌خروجی در نظر گرفت. اگر تمام ورودی‌های  $(P_\alpha, P_\beta, \dots, P_\omega)$  و

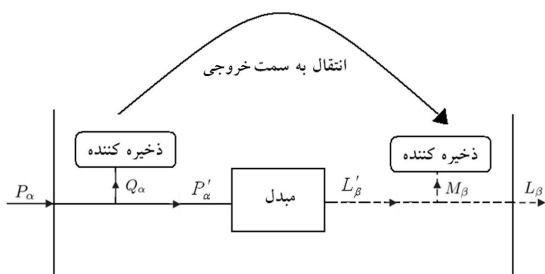
<sup>1</sup> Direct connection

<sup>2</sup> Converter



## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

خروجی و یا بین مبدل‌های ارتباط دهنده ورودی و خروجی قرار بگیرد. مستقل از اینکه ذخیره‌کننده در کجا قرار گرفته باشد، توان ذخیره‌شده می‌تواند با یک سری روابط ریاضی، به سمت دیگر منتقل شود.



شکل (۵). تجهیز ذخیره‌کننده درون هاب

معادلات لازم برای انتقال ذخیره‌کننده به سمت خروجی (مطابق شکل ۵) در روابط (۱۰-۱۴) آمده است.

$$L + M = C[P - Q] \quad (10)$$

$$L = C[P - Q] - M = CP - M^{eq} \quad (11)$$

$$M^{eq} = c_{\alpha\beta} Q_{\alpha} + M_{\beta} = \frac{c_{\alpha\beta}}{e_{\alpha}} \dot{E}_{\alpha} + \frac{1}{e_{\beta}} \dot{E}_{\beta} \quad (12)$$

$$M^{eq} = CQ + M \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} M_{\alpha}^{eq} \\ M_{\beta}^{eq} \\ \vdots \\ M_{\omega}^{eq} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{\alpha\alpha} & s_{\beta\alpha} & \cdots & s_{\omega\alpha} \\ s_{\alpha\beta} & s_{\beta\beta} & \cdots & s_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{\alpha\omega} & s_{\beta\omega} & \cdots & s_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_S \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{E}_{\alpha} \\ \dot{E}_{\beta} \\ \vdots \\ \dot{E}_{\omega} \end{bmatrix}}_E \quad (14)$$

ماتریس  $S$  در رابطه (۱۴)، ماتریس تزویج ذخیره است. بنابراین رابطه بین ورودی و خروجی هاب با در نظر گرفتن عنصر ذخیره‌کننده انرژی بصورت رابطه (۱۵) خواهد بود [۹]:

$$\begin{aligned} L = C[P - Q] - M &= CP - SE \\ &= [C \quad -S] \begin{bmatrix} P \\ \dot{E} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

این رابطه مدل کامل هاب انرژی شامل مبدل و ذخیره‌کننده را بیان می‌کند.

## ۴- توزیع بهینه انرژی

وجود حامل‌های مختلف انرژی در سمت ورودی هاب، و امکان تبدیل و ذخیره‌سازی آن‌ها در قسمت داخلی، باعث

در شکل ۳ انرژی ورودی  $\alpha$  بین  $N$  مبدل تقسیم شده است. ضریب توزیع  $v_{\alpha k}$  مشخص می‌کند که چقدر از انرژی  $\alpha$  به مبدل  $k$  وارد می‌شود.

$$P_{\alpha k} = v_{\alpha k} P_{\alpha} \quad (6)$$

از آنجایی که هر کدام از انشعابات بخشی از کل انرژی  $\alpha$  را انتقال می‌دهد، تمامی ضرایب توزیع کوچکتر یا مساوی یک هستند.

$$0 \leq v_{\alpha k} \leq 1 \quad (7)$$

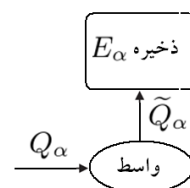
همچنین مجموع همه ضرایب توزیع مربوط به یک نقطه

انشعاب برابر با یک است

$$\sum_{k \in C_{\alpha}} v_{\alpha k} = 1 \quad \forall \alpha \quad (8)$$

## ۳-۲ ذخیره انرژی

در این قسمت مدل کامل هاب با در نظر گرفتن ذخیره‌کننده ارائه شده است. مدل کلی برای تجهیز ذخیره‌کننده بصورت شکل (۴) می‌باشد. این مدل کلی برای ذخیره انرژی شامل یک بخش واسط<sup>۱</sup> و یک بخش ذخیره‌کننده داخلی<sup>۲</sup> ایده‌آل است [۷]. کیفیت انرژی موردنظر می‌تواند از طریق واسط، تغییر کند و یا به نوع دیگری از انرژی تبدیل شود و سپس ذخیره شود. در این صورت می‌توان نوع انرژی ذخیره‌شده و انرژی ورودی به سیستم ذخیره‌کننده را یکسان در نظر گرفت.



شکل (۴). مدل تجهیز ذخیره‌کننده

لذا مدل‌سازی واسط ذخیره‌کننده شبیه به مدل یک مبدل خواهد بود. در نتیجه رابطه بین میزان انرژی ورودی و خروجی در حالت ماندگار بصورت رابطه (۹) خواهد بود:

$$\tilde{Q}_{\alpha} = e_{\alpha} Q_{\alpha} \quad (9)$$

هاب انرژی ممکن است دارای چندین ذخیره‌کننده باشد. در حالت کلی ذخیره‌کننده می‌تواند در سمت ورودی،

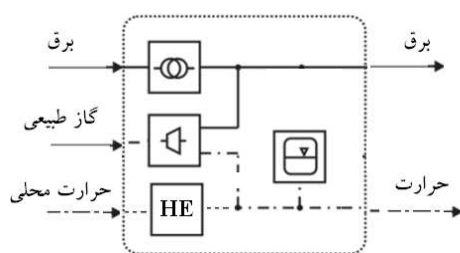
<sup>1</sup> Interface

<sup>2</sup> Internal storage

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

## ۵- هاب نمونه مورد مطالعه

برای شبیه‌سازی توزیع بهینه یک هاب تنها، در سیستم یکپارچه انرژی دارای حامل‌های متعدد، هاب انرژی مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است که شامل ترانسفورمر، CHP، مبادله‌گر حرارت (HE) و ذخیره‌کننده می‌باشد.



شکل (۶) - هاب انرژی مورد مطالعه

لذا ماتریس تزویج و ذخیره این سیستم بصورت زیر است

$$C = \begin{bmatrix} \eta_{ee}^T & \eta_{ge}^{CHP} & \eta_{dhe}^{HE} \\ 0 & \eta_{gh}^{CHP} & \eta_{dhh}^{HE} \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/e_h \end{bmatrix} \quad (18)$$

که

$$e_\alpha = \begin{cases} e_\alpha^+ & \text{شارژ یا آماده بکار} \\ 1/e_\alpha^- & \text{تخلیه} \end{cases} \quad (19)$$

فرض شده است در ابتدای دوره میزان انرژی ذخیره‌کننده، نصف حداکثر انرژی قابل ذخیره در آن باشد. بار مصرفی و قیمت انرژی در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در جدول پیوست آمده است. برای گاز و حرارت محلی قیمت ثابت و برای برق قیمت متغیری در طول شبانه‌روز، در نظر گرفته شده است. تابع هدف کل هزینه انرژی است که بایستی حداقل شود.

$$\text{cost} = \sum_{t=1}^{24} (\pi_e^t p_e^t + \pi_g^t p_g^t + \pi_{dh}^t p_{dh}^t) \quad (20)$$

در رابطه فوق،  $\pi_e^t$  و  $\pi_g^t$  و  $\pi_{dh}^t$  بترتیب قیمت برق و گاز و حرارت در هر بازه زمانی می‌باشد. مشخصات عناصر هاب انرژی و محدودیت‌ها در جداول (۱) و (۲) آمده است. ساختار کلی مسئله بصورت رابطه (۱۷) می‌باشد.

جدول (۱) - مشخصات عناصر هاب

$\eta_{ee}^T$	$\eta_{ge}^{CHP}$	$\eta_{gh}^{CHP}$	$\eta_{dhh}^{HE}$	$e_\alpha^+$	$e_\alpha^-$
۰/۹۸۵	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۹	۰/۹	۰/۹

انعطاف‌پذیر زیاد هاب در تأمین بار متصل به شبکه می‌شود. به مسئله پخش بار در یک هاب، توزیع بهینه هاب می‌گوییم [۴]. در توزیع بهینه، بهینه‌سازی فاز بهره‌برداری سیستم‌های یکپارچه انرژی انجام می‌شود. در توزیع بهینه یک هاب انرژی فاقد عنصر ذخیره‌کننده، (بهینه‌سازی برای یک لحظه)، با در نظر گرفتن یک ماتریس C و برای یک بار مشخص L، بردار بهینه ورودی P، با بهینه نمودن تابع هدف بدست می‌آید. تابع هدف بعنوان تابعی از بردار توان ورودی و ضرایب توزیع  $U_{ak}$  بیان می‌شود. تابع هدف می‌تواند هزینه انرژی، آلودگی زیست محیطی و ... را در بر بگیرد. در اینصورت ساختار مسئله بصورت رابطه (۱۶) خواهد بود.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(P, v_{ak}) \\ & \text{subject to } L - CP = 0 \\ & \underline{P} \leq P \leq \bar{P} \\ & \underline{P}_{ak} \leq v_{ak} P_\alpha \leq \bar{P}_{ak} \quad \forall \alpha \in \mathcal{E}, \forall k \in C_\alpha \\ & 0 \leq v_{ak} \leq 1 \quad \forall \alpha \in \mathcal{E}, \forall k \in C_\alpha \end{aligned} \quad (16)$$

هنگامی که تجهیز ذخیره‌کننده را در سیستم در نظر می‌گیریم، تابع هدف می‌تواند به میزان انرژی ذخیره شده  $E_i^t$  (که  $i$  نشان‌دهنده هاب و  $t$  بیانگر دوره زمانی است) بستگی داشته باشد. همچنین بردارهای معادل ذخیره انرژی  $M_i^{eq}$  بایستی در معادلات هاب لحاظ شود.

علاوه بر این‌ها قیود نامساوی مربوط به محدودیت توان و انرژی عنصر ذخیره‌کننده بایستی اضافه شود. بنابراین توزیع بهینه سیستم چند حاملی با پریودهای متعدد<sup>۱</sup> می‌تواند بصورت رابطه (۱۷) بیان شود:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f = \sum_{t=1}^{N_t} f^t(P_i^t, v_{iak}^t, E_i^t) \\ & \text{subject to } L_i^t - C_i^t P_i^t + M_i^{eq,t} = 0 \quad \forall i, t \\ & \underline{P}_i \leq P_i^t \leq \bar{P}_i \quad \forall i, t \\ & \underline{Q}_{i\rho} \leq Q_{i\rho}^t \leq \bar{Q}_{i\rho} \quad \forall i, t, \rho \\ & \underline{M}_{i\sigma} \leq M_{i\sigma}^t \leq \bar{M}_{i\sigma} \quad \forall i, t, \sigma \\ & \underline{E}_i \leq E_i^t \leq \bar{E}_i \quad \forall i, t \\ & E_i^0 - E_i^1 = 0 \quad \forall i \\ & \underline{P}_{iak} \leq v_{iak}^t P_{i\alpha}^t \leq \bar{P}_{iak} \quad \forall \alpha, k, i, t \\ & 0 \leq v_{iak}^t \leq 1 \quad \forall \alpha, k, i, t \end{aligned} \quad (17)$$

<sup>۱</sup> Multi-period multi-carrier optimal dispatch

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

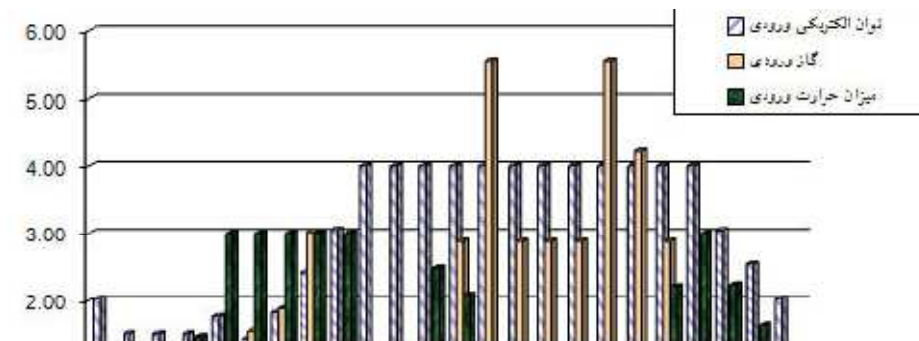
شکل (۷) میزان انرژی بهینه ورودی از هر نوع را بصورت نرمالیزه و بر حسب درصد نمایش می‌دهد. در شکل (۸) میزان انرژی حرارتی ذخیره شده نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت؛ از شروع دوره تا ساعت ۴ به علت نبودن بار حرارتی، تمام حرارت ورودی ذخیره می‌شود. در این ساعات بدلیل ارزانی و کم بودن بار الکتریکی تمام برق مصرفی از ورودی الکتریکی تامین می‌شود و CHP خاموش است. از ساعت ۵ تا ۹ که بار حرارتی وجود دارد بدلیل محدودیت، ورودی حرارت به تنهایی قادر به پاسخگویی بار حرارتی نیست و شکل (۸) گویای این مسئله است زیرا نشان می‌دهد که ذخیره‌کننده در حال تخلیه انرژی یا دشارژ است. اگر به شکل‌های (۶) و (۷) توجه شود مشخص است که دشارژ ذخیره‌کننده هم برای تامین بار حرارتی کافی نیست و بایستی CHP وارد مدار شود و قسمتی از بار حرارتی را تامین کند و در نتیجه میزانی از بار الکتریکی نیز توسط CHP تامین می‌شود. برای دیگر ساعات شبانه روز نیز می‌توان تحلیل‌های مشابهی انجام داد.

جدول (۲) - محدودیت میزان انرژی ورودی و ذخیره

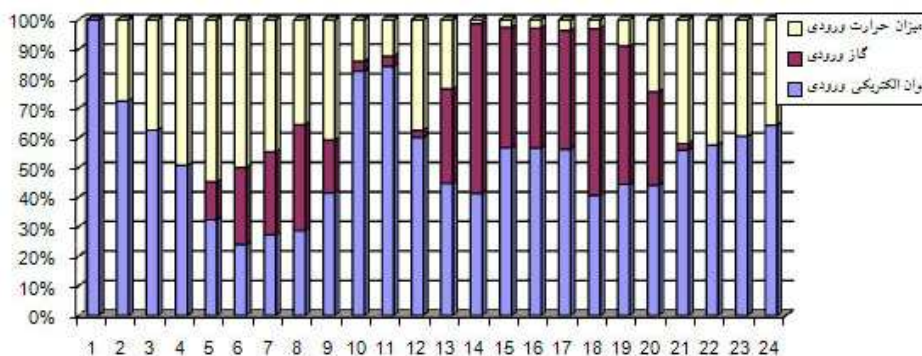
$0 \leq p_e \leq 4$	$0 \leq p_g \leq 4$	$0 \leq p_{dh} \leq 4$
$0 \leq p_{storage}^{in \& out} \leq 4$	$0 \leq E_{storage} \leq 4$	

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۶) میزان بهینه ورودی‌های برق، گاز و حرارت را در ۲۴ ساعت شبانه روز نشان می‌دهد. میزان گاز طبیعی ورودی با رنگ روشن، میزان حرارت ورودی با رنگ تیره و میزان توان الکتریکی با ستون‌های هاشور زده مشخص گردیده است. در ساعات ۱۳ تا ۱۹ که مصرف برق زیاد و قیمت آن بالاتر است میزان گاز ورودی نیز زیاد است. در ساعت ۲۰ با اینکه قیمت برق کاهش یافته اما چون مصرف حرارت زیاد و ورودی آن محدود است و از طرفی ورودی برق به تنهایی نمی‌تواند نیاز بار الکتریکی را پاسخگو باشد، بنابراین CHP وارد عمل شده و با مصرف کردن گاز این موارد را تصحیح می‌کند. در ساعت ۸ نیز به علت بالا بودن مصرف حرارت مصرف گاز با افزایش نسبی همراه می‌باشد.



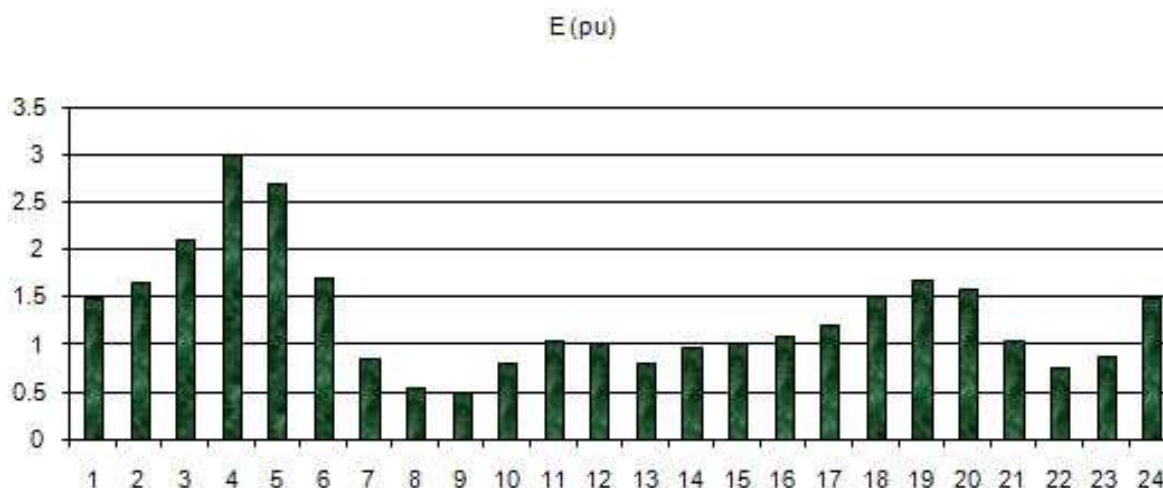
شکل (۶) - میزان انرژی بهینه سمت ورودی هاب برای تامین بار (توزیع بهینه)



شکل (۷) - سهم هر یک از حامل‌های ورودی در تامین بار

شکل (۸) - میزان سهم بهینه انرژی‌های ورودی برای تامین بار متصل به هاب بر حسب درصد

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۸) - میزان بهینه ذخیره حرارتی در طی شبانه روز

[2] B. Bakken, A. Haugstad, K.S.Hornnes, and S. Vist. "Simulation and optimization of systems with multiple energy carriers" In Proc. Of Scandinavian Conference on Simulation and Modeling, Linköping, Sweden, 1999

[3] M.Geidl; G.Andersson et all "Energy hubs for the future"; *Power and Energy Magazine, IEEE Volume: 5, Issue: 1*

[4] M.Geidl; G.Andersson "Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers"; *Power Systems, IEEE Transactions on Volume: 22, Issue: 1*

[5] M.Geidl; G.Andersson "Optimal Coupling of Energy Infrastructures" *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne Publication Year: 2007, Page(s): 1398 - 1403*

[6] L.Carradore; F.Bignucolo. "Distributed multi-generation and application of the energy hub concept in future networks"; Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International Digital Object Identifier: 10.1109/UPEC.2008.4651593 Publication Year: 2008, Page(s): 1 - 5

[7] M.Geidl, Andersson, G "Integrated multi-carrier energy systems" Power system laboratory ETH Zurich 2007

[8] F.Perrod, "A vision of future energy networks"; *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/PESAfr.2005.1611778*

[9] D.Poli; S.Scalari; L.Carradore, et all "Integration of process-side energy storage and active distribution networks: Technical and economical optimisation" *Electricity Distribution, 2009 20th International Conference and Exhibition on Publication Year: 2009, Page(s): 1 - 4*

## ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله توزیع بهینه در سیستم‌های یکپارچه انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم‌ها انرژی‌های مختلف با هم تبادل و همکاری دارند. این کار با در نظر گرفتن مفهوم جدید هاب انرژی، که امکان تزویج و مبادله بین انرژی‌های مختلف را ممکن می‌سازد، انجام شده است. مسئله توزیع بهینه انرژی یک مسئله بهینه‌سازی است که در آن میزان توان بهینه ورودی به یک هاب انرژی برای تامین بار متصل به آن تعیین می‌شود.

در این مقاله مسئله توزیع بهینه انرژی در پریودهای متعدد تعریف شده و مدل با در نظر گرفتن عنصر ذخیره‌کننده شبیه‌سازی شده است. در خروجی مدل میزان بهینه انرژی هر یک از حامل‌ها و همچنین انرژی ذخیره شده نیز در پریودهای مختلف تعیین شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل روی یک هاب نمونه، همکاری و تبادل بین انرژی‌های مختلف بخصوص در زمان محدودیت توان‌های ورودی را بخوبی نشان می‌دهد.

## مراجع

[1] M.Shahidehpour. "Our aging power systems": Infrastructure and life extension issues. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(3): 22-76



**بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق**

پیوست

میزان بار مصرفی و قیمت انرژی در طی یک شبانه روز

زمان	بار حرارتی pu	بار الکتریکی pu	قیمت حرارت mu/pu	قیمت گاز mu/pu	قیمت برق mu/pu
۱	۰	۲	۳	۷	۸
۲	۰	۱/۵	۳	۷	۸
۳	۰	۱/۵	۳	۷	۸
۴	۰	۱/۵	۳	۷	۸
۵	۳	۲	۳	۷	۸
۶	۴	۲	۳	۷	۸
۷	۴	۲/۵	۳	۷	۸
۸	۴	۳/۵	۳	۷	۱۰
۹	۳	۳/۵	۳	۷	۱۰
۱۰	۰	۴	۳	۷	۱۰
۱۱	۰	۴	۳	۷	۱۰
۱۲	۲	۴	۳	۷	۱۰
۱۳	۳	۵	۳	۷	۱۴
۱۴	۲	۶	۳	۷	۱۴
۱۵	۱	۵	۳	۷	۱۴
۱۶	۱	۵	۳	۷	۱۴
۱۷	۱	۵	۳	۷	۱۴
۱۸	۲	۶	۳	۷	۱۴
۱۹	۲	۵/۵	۳	۷	۱۴
۲۰	۳	۵	۳	۷	۱۰
۲۱	۳	۴	۳	۷	۱۰
۲۲	۲	۳	۳	۷	۱۰
۲۳	۱	۲/۵	۳	۷	۸
۲۴	۰	۲	۳	۷	۸