

ارزیابی اقتصادی هاب انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

سید محسن هاشمی^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، محمد کاظم شیخ‌الاسلامی^۲، استادیار، محسن پارسا مقدم^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران

mohsen.hashemi@modares.ac.ir

aleslam@modares.ac.ir

parsa@modares.ac.ir

چکیده: بهره‌برداری همزمان از زیرساخت‌های مختلف انتقال و تولید انرژی همچون شبکه گاز و برق موضوعی است که تحت مفهوم هاب انرژی^۱ مطرح شده است. سودآوری هاب‌های انرژی در حضور عدم قطعیت‌های مختلفی که با حضور انواع حامل‌های انرژی شدت بیشتری نیز می‌یابد از مسایلی است که مورد توجه سرمایه‌گذاران در این حوزه می‌باشد. در این مقاله با توجه به عدم قطعیت‌های موجود، از روش برنامه‌ریزی تصادفی برای تامین بار الکتریکی و حرارتی یک ناحیه توسط هاب انرژی در حالتی که امکان استفاده از قراردادهای بلند مدت خرید انرژی در کنار خرید از بازار لحظه‌ای انرژی نیز موجود است، استفاده شده است. در این مقاله علاوه بر تعیین راهبرد خرید انرژی از بازار و قراردادهای بلندمدت، بهبود ساختاری هاب با تعیین موثرترین تجهیزات در کاهش هزینه‌های سالانه مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، مدلسازی‌ها بر روی یک هاب انرژی نوعی که از تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی نیز بهره‌مند است، انجام شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: هاب انرژی، ارزیابی اقتصادی، برنامه‌ریزی تصادفی، عدم قطعیت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد کاظم شیخ‌الاسلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: aleslam@modares.ac.ir

۱- مقدمه

همچون بازدهی تجهیزات، میزان بار و قیمت انرژی وجود دارد، از روش بهینه‌سازی مقاوم^۲، جهت تعیین برنامه بهره‌برداری استفاده شده است. در [۱۳] با بهره‌گیری از مفهوم هاب انرژی به مدیریت همزمان حرارت و برق در یک ناحیه‌ی مسکونی پرداخته شده است. در [۱۴] در یک چارچوب شبیه‌سازی، تکنولوژی‌های مختلف انرژی ترکیب شده و بر اساس مواردی همچون: مجموع انرژی تولیدی، هزینه بر واحد انرژی تولیدی و مقدار تولید آلاینده‌ی به ارزیابی تکنولوژی‌ها پرداخته شده است. همچنین جهت مقایسه، سناریوهای مختلفی که ترکیبات متفاوتی را ارائه می‌دهند، بررسی شده است. در [۱۵] یک مدل احتمالاتی برای مسئله پخش بار اقتصادی در سیستم‌های متشکل از چندین حامل انرژی ارائه شده است. مدل ارائه شده با بهره‌گیری از برخی تکنیک‌های بهینه‌سازی مقاوم، امکان یافتن نقطه بهینه مطلق در مسئله پخش بار اقتصادی را فراهم آورده است. در [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] ملاحظه می‌گردد، تابع هدف مرکبی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تشکیل شده و به تحلیل هزینه و فایده پرداخته شده است. همچنین در [۱۲]، تاثیر توسعه‌ی شبکه گاز بر ظرفیت بهینه تجهیزات هاب نیز مطالعه شده است.

ارزیابی اقتصادی یک هاب انرژی در یک دوره زمانی با توجه به عدم قطعیت بالایی که در پیش‌بینی قیمت حامل‌های مختلف انرژی وجود دارد، از اهمیت و ارزش بالایی برخوردار است. موضوع مورد بحث از مباحثی است که به تازگی و تحت عنوان ارزیابی اقتصادی هاب انرژی، در این حوزه مطرح شده است. در مرجع [۱۹]، عدم قطعیت فوق بر اساس روش مونت‌کارلو مدل‌سازی شده و با تولید روندهای قیمتی مختلف در طول یک‌سال به مدلسازی پرداخته شده است، که حل مسئله با تعداد بالای تکرار مونت‌کارلو (برای رسیدن به پاسخ قابل قبول) زمان بسیار زیادی احتیاج دارد. همچنین با صرف نظر از امکان خرید انرژی طی قراردادهای بلندمدت، به ساده‌سازی مسئله پرداخته شده است. در مرجع [۲۰] به بهینه‌سازی ساختاری هاب انرژی در فاز احداث پرداخته شده و ظرفیت نصب تجهیزات مختلف مبدل و ذخیره‌ساز انرژی انتخاب شده‌اند. نحوه‌ی توسعه و ارتقای کیفی تجهیزات، با نگاهی جامع، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پیش‌بینی قیمت و با دخالت تاثیر تصمیم‌گیری‌های بلندمدت خرید انرژی، از جمله موارد مهمی است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

۳- مدلسازی هاب انرژی

در یک نگاه کلی، هاب انرژی متشکل از مبدل‌های مختلف انرژی همچون: واحد تولید همزمان برق و حرارت، چیلرهای جذبی، پیل سوختی و ذخیره‌سازهایی همچون: باتری الکتریکی، مخزن آب گرم و مخزن گاز می‌باشد. بر این اساس می‌توان هاب انرژی را با یک مدل عمومی توصیف‌گر تبدیل و ذخیره‌سازی حامل‌های مختلف انرژی، مدل‌سازی نمود. با توجه به [۲۱] و [۲۲] باید عناصر مختلف شامل مبدل‌ها و ذخیره‌کننده‌ها مدلسازی

نحوه‌ی تامین انرژی مورد نیاز مصارف مختلف در سال‌های پیش‌رو، از موضوعات مهم در حوزه‌ی انرژی است. این مسئله به حامل انرژی خاصی محدود نشده و تمام حامل‌های مرسوم انرژی می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. گسترش روزافزون استفاده از واحدهای تولید همزمان برای تولید برق و حرارت [۱] و برق و حرارت و برودت [۲] می‌تواند بیانگر قابلیت جایگزینی حامل‌های مختلف انرژی همچون برق و گاز با یکدیگر بوده و افزونگی بالایی برای سیستم تامین انرژی به همراه داشته باشد [۳][۴]. گاهی ممکن است از نظر اقتصادی مصرف گاز برای تولید برق، در مقایسه با تزریق مستقیم توان الکتریکی از شبکه برق به صرفه‌تر باشد. برای مثال در ساعات پیک شبکه برق، به دلیل بالا بودن قیمت برق ترجیحاً بهتر است بار الکتریکی با استفاده از مبدلی همچون واحد تولید همزمان برق و حرارت و با مصرف گاز تامین شود. علاوه بر این، وجود امکان ذخیره‌سازی انرژی از مواردی است که انعطاف بهره‌برداری هاب انرژی را افزایش می‌دهد.

هدف این مقاله ارائه‌ی چارچوبی برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه‌ی تامین انواع بارها (حامل‌های مختلف انرژی) در یک هاب انرژی مجهز به مبدل‌ها و ذخیره‌سازهای انرژی، با امکان خرید از بازار انرژی و قراردادهای بلندمدت و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پیش‌بینی قیمت می‌باشد. در نهایت با بهره‌گیری از چارچوب فوق به تصمیم‌گیری‌هایی در مورد نحوه‌ی ارتقای بازدهی تجهیزات در یک هاب انرژی پرداخته می‌شود. بدین منظور، در بخش دوم پیشینه تحقیق بررسی می‌شود. در بخش سوم، به مدل‌سازی هاب انرژی پرداخته و بخش چهارم با تبیین روش برنامه‌ریزی تصادفی، مسئله مدل‌سازی عدم قطعیت در هاب و فرمولاسیون ریاضی آن را در بر می‌گیرد. در نهایت، بخش پنجم به مطالعه موردی اختصاص می‌یابد.

۲- پیشینه تحقیق

مقالات منتشر شده در این حوزه، عموماً به معرفی مسایل بهینه‌سازی پرداخته‌اند. بنابراین مطالعه‌ی برخی از مسایل پایه‌ی بهینه‌سازی همچون: مسئله‌ی پخش بار اقتصادی، مسئله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قیود شبکه انتقال انرژی [۵]، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از نیروگاه‌های آبی [۶] و مسئله ساختار بهینه نیروگاهی [۷]، در فهم مدل‌سازی‌های هاب انرژی موثرند. عموم مسایل بهینه‌سازی مطرح شده در این حوزه به دنبال دستیابی به بهینگی اقتصادی بوده و به علاوه، مواردی همچون [۸] و [۹] نیز کاهش آلاینده‌های زیست محیطی را دنبال می‌کنند. در [۱۰]، تابع هدف بر اساس هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه در نصب تجهیزات، تعریف شده و به تعیین ظرفیت تجهیزات مبدل انرژی پرداخته شده است. در [۱۱] و [۱۲]، با این فرض که امکان وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی مسئله

$$\underline{L} = \underline{A} * \underline{P} \rightarrow \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d1} & \cdots & a_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

در روابط فوق، m تعداد مبدل‌ها، n تعداد حامل‌های ورودی انرژی و d انواع بارهای هاب انرژی می‌باشد.

۳-۲- ذخیره‌ساز

تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی، می‌توانند در ورودی و یا خروجی هاب انرژی حضور داشته باشند. مطابق مدل‌سازی [۲۳]، تمامی ذخیره‌کننده‌ها قابل انتقال به سمت خروجی بوده و توان معادل ذخیره شده در خروجی به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$\underline{M}_{eq} = \underline{A} * \underline{\dot{E}}_I + \underline{\dot{E}} \Rightarrow \underline{M}_{eq} = \underline{S} * \underline{\dot{E}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} M_1^{eq} \\ \vdots \\ M_d^{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d1} & \cdots & a_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{1,I} \\ \vdots \\ \dot{E}_{n,I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

به این ترتیب، مدل کامل هاب انرژی دارای تجهیزات مبدل و ذخیره‌ساز انرژی، به صورت رابطه‌ی (۵) است.

$$\underline{L} = \underline{A} \underline{P} - \underline{S} \underline{\dot{E}} = \begin{bmatrix} \underline{A} & -\underline{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{P} \\ \underline{\dot{E}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه‌های فوق داریم:

M_{eq} : تغییرات انرژی ذخیره شده معادل در خروجی

\dot{E}_I : تغییرات انرژی ذخیره شده در ذخیره سازهای سمت ورودی

\dot{E} : تغییرات انرژی ذخیره شده در ذخیره سازهای سمت خروجی

L : ماتریس توان‌های خروجی یا بارها

A : ماتریس تبدیل انرژی معادل

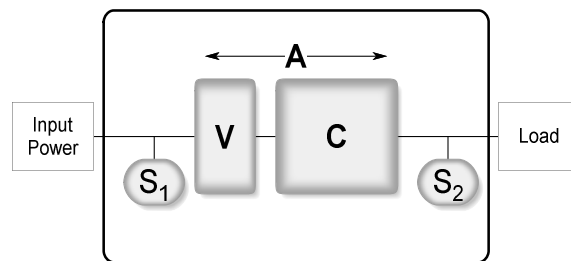
P : ماتریس توان‌های ورودی

S : ماتریس ذخیره‌سازی انرژی معادل در خروجی

۴- برنامه‌ریزی تصادفی

با توجه به وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی میزان قیمت و تقاضای حامل‌های مختلف برای دوره‌های مختلف در یک سال، مناسب است از روش برنامه‌ریزی تصادفی که در آن بر اساس سناریوهای مختلف قیمت و تقاضا تصمیم‌گیری می‌شود، استفاده شود. در تصمیم‌گیری با حضور عدم قطعیت، تصمیم‌گیر باید تصمیم‌گیری بهینه‌ای در یک افق زمانی و با اطلاعات ناکامل

شوند. قابل ذکر است، در این مقاله، در مدل پیشنهادی مراجع فوق تغییراتی داده شده است که حل مساله را ساده‌تر می‌کند. در مدل جدید، ماتریس تبدیل به دو ماتریس C و V که به ترتیب نحوه‌ی تبدیل انرژی از ورودی به خروجی هر مبدل و نحوه‌ی پخش انرژی ورودی بین مبدل‌ها را مدل‌سازی می‌کنند، تجزیه شده است. این مدل در حل مسایل بزرگ که حامل‌های متعدد انرژی و مبدل‌های گوناگون را شامل می‌شوند، برای استفاده در حل ماتریسی مسئله بسیار مناسب است. از سوی دیگر نمایش در این قالب، این امکان را فراهم می‌آورد که به صورت جداگانه به بررسی تاثیرات پارامترهای مختلف پردازیم. برای مثال، فرایند پیری تجهیزات پدیده‌ایست که بر بازدهی مبدل‌ها تاثیر داشته و می‌بایست به صورت جداگانه نسبت به ماتریس ضریب پخش بررسی گردد. به علاوه اینکه در شرایط معمول، بازدهی عناصر در قالب پارامترهای ورودی مسئله بیان شده ولی ضریب پخش از جنس مجهولات مسئله بوده و با حل آن تعیین می‌گردد. مدل مفهومی جدید به صورت بلوک دیاگرام شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): مدل مفهومی مناسب جهت محاسبات هاب انرژی، با افزایش تعداد تجهیزات

V : بخش تقسیم توان ورودی بین مبدل‌ها.

C : بخش تبدیل انرژی

V_1 : بخش ذخیره‌سازی حامل‌های انرژی در ورودی هاب

V_2 : بخش ذخیره‌سازی حامل‌های انرژی در خروجی هاب

A : مبدل معادل انرژی از ورودی به خروجی

۳-۱- مبدل

در روابط (۱) و (۲)، با معرفی P به عنوان توان‌های ورودی و L به عنوان بار، ماتریسی تحت عنوان ماتریس معادل تبدیل انرژی (A)، تعریف می‌شود. و خواهیم داشت:

$$\underline{A}^T = \underline{V} * \underline{C} = \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{1n} & \cdots & V_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{d1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1m} & \cdots & C_{dm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

انرژی با ساده‌ترین مدل وارد شده است و برای اجتناب از پیچیدگی، از سازوکارهای مختلف بازار صرف نظر شده است.

قراردادهای خرید بلندمدت انرژی اینگونه در نظر گرفته شده‌اند که با خرید x_1 واحد انرژی به قیمت λ_1 طی قرارداد اول، تا این مقدار مصرف انرژی با قیمت λ_1 تسویه شده، و با فراتر رفتن میزان مصرف از مقدار x_1 مابقی انرژی مصرفی طبق قرارداد x_2 که در اولویت دوم (در فرایند تسویه) قرار دارد تسویه می‌شود، و در صورت نبود هیچ‌گونه قرارداد دیگری، با قیمت بازار محاسبه خواهد شد. در انتخاب قراردادها فرض شده است که اولویت تسویه حساب از قبل تعیین شده باشد، به عنوان مثال اگر به میزان ۵۰ واحد قرارداد بلندمدت زمانی به قیمت ۵ واحد و ۳۰ واحد قرارداد بلند مدت از نوع پیک به قیمت ۸ واحد خریداری شده باشد، و با فرض مقدار بار معادل ۴۰ واحد، بر اساس اولویت قراردادها در تسویه حساب داریم:

الف) اولویت با قرارداد زمانی:

$$40 \times 5 = 200$$

ب) اولویت با قرارداد پیک:

$$30 \times 8 + (40 - 30) \times 5 = 290$$

با افزایش میزان مصرف از مجموع ظرفیت قراردادها، مابقی انرژی مورد نیاز از طریق بازار انرژی تامین می‌شود. با توجه به نامعلوم بودن میزان انرژی ورودی و مقدار قراردادها در تابع هدف (که از نوع هزینه است) باید تمامی حالات ممکن بین بازه‌های قرارداد و انرژی ورودی فرض شده و مسئله بهینه‌سازی حل شود. در نمودار شکل ۳ با فرض دو نوع قرارداد به تبیین تابع هدف پرداخته شده است. قابل ذکر است، باید مجموع هزینه‌ها در تمامی دوره‌های زمانی و برای تمام حامل‌های ورودی انرژی لحاظ شود. با فرض عدم قطعیت در قیمت حامل‌های ورودی انرژی، برای هر سناریوی قیمتی، روند زیر اجرا شده و به عنوان هزینهی سناریوی مربوطه در تابع هدف مطابق رابطه (۱۳)، به کار رفته است. در این رابطه هزینهی اولیه انتخاب هر یک از قراردادها نیز می‌تواند در محاسبه هزینهی متوسط ناشی از سناریوی‌های مختلف لحاظ گردد. قیود مختلف تساوی و نامساوی شامل قید تامین انرژی بار، برابری انرژی ذخیره‌شده در اولین و آخرین دوره‌های زمانی (که بیانگر استفاده از تمام انرژی ذخیره‌شده در دوره‌های مختلف می‌باشد)، محدودیت در توان خریداری شده از قراردادها، محدودیت در ظرفیت ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی، در فرایند کمینه کردن هزینه‌ها لحاظ شده‌اند.

$$Fwt_1 = Fw_1(i) \times T_{1,t} \quad (9)$$

$$Cost_A = \sum_i \sum_t \left[\lambda_{Fw_{1,i}} \times P(i, j, t) \right] \quad (10)$$

$$Cost_B = \sum_i \sum_t \left[\lambda_{Fw_{1,i}} \times Fwt_1(i) + \lambda_{Fw_{2,i}} \times (P(i, j, t) - Fwt_1(i)) \right] \quad (11)$$

$$Cost_C = \sum_i \sum_t \left[\lambda_{Fw_{1,i}} \times Fwt_1(i) + \lambda_{Fw_{2,i}} \times Fwt_2(i) + \lambda_{p_{i,j,t}} \times (P(i, j, t) - Fwt_1(i) - Fwt_2(i)) \right] \quad (12)$$

انجام دهد [۲۴]. این افق تصمیم‌گیری به مراحل تقسیم‌بندی می‌شود. در هر مرحله، تصمیم‌گیری‌هایی انجام شده و عدم قطعیت به طور جزئی یا کلی از بین می‌رود. به عنوان مثال، در شکل ۲ نمونه‌ای از یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی با دو مرحله‌ی تصمیم‌گیری نمایش داده شده است. ساختار کلی یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی به صورت زیر است:

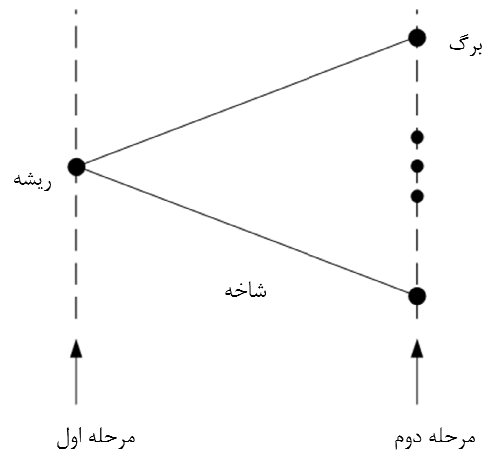
$$\text{Minimize}_{x,y(\omega)} z = c^T x + \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) q(\omega)^T y(\omega) \quad (6)$$

$$\text{subject to} \quad Ax = b \quad (7)$$

$$(8)$$

$$T(\omega)x + W(\omega)y(\omega) = h(\omega), \forall \omega \in \Omega$$

$$x \in X, y(\omega) \in Y, \forall \omega \in \Omega$$

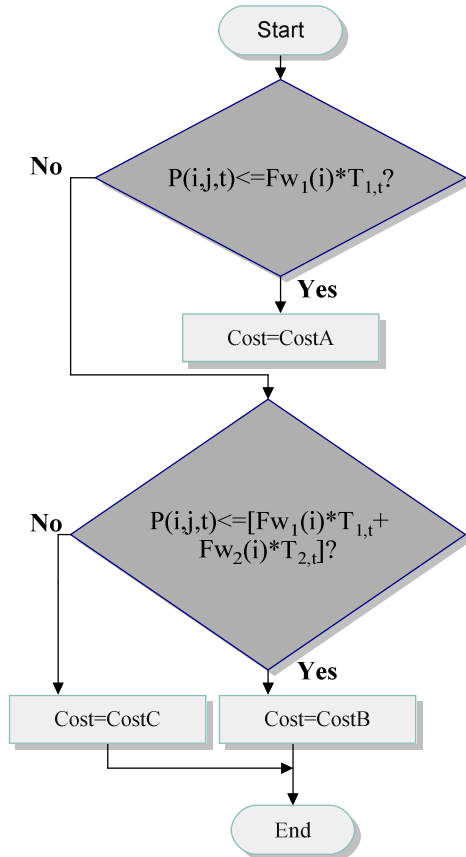


شکل (۲): درخت سناریو برای برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

در روابط (۶)، (۷) و (۸)، x و y ، به ترتیب ماتریس متغیرهای تصمیم در مرحله ۱ و ۲ هستند. ω نماینده سناریوها و Ω مجموعه‌ی تمام سناریوهای تعریف شده است. $\pi(\omega)$ احتمال رخداد هر سناریو بوده و پارامترها و متغیرهایی همچون $c, q(\omega), b, h(\omega), A, T(\omega)$ و $W(\omega)$ روابط حاکم بر متغیرهای تصمیم در ساختار مسئله را نشان می‌دهند. متغیر z می‌تواند جمع هزینه‌های حاصل از تصمیم‌گیری‌ها باشد. تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای در مسایل بزرگ نیز همانند روش فوق قابل انجام است.

۴-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت در هاب انرژی

بهره‌بردار یا مالک هاب انرژی برای تامین نیاز مصرفی انواع حامل‌های انرژی می‌تواند از بازارهای انرژی الکتریکی و بازار گاز در کوتاه مدت و از قراردادهای بلندمدت تامین انرژی الکتریکی و... استفاده کند. با فرض ثابت بودن بار، تنها عدم قطعیت قیمت‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. علاوه بر این، فرض می‌شود که تصمیم‌گیر توجهی به مساله ریسک نداشته و تنها در پی کمینه کردن هزینه‌های انتظاری هاب باشد. همچنین در این مسئله، بازار



شکل (۳): روندنمای تبیین تابع هدف

با حل مسئله برای یک هاب انرژی با آرایش تجهیزاتی مشخص، در یک دوره‌ی زمانی بلند مدت می‌توان بهترین راهبرد خرید انرژی، نحوه‌ی بهره‌برداری از مبدل‌ها و مقدار ذخیره‌سازی انرژی را به نحوی که کمترین هزینه تحمیل شود، معین کرد. با توجه به بلندمدت بودن مطالعات، لزوماً ذخیره‌سازی بلندمدت هر نوع حامل انرژی از لحاظ فنی ممکن نبوده و تنها حامل‌های محدودی (همچون گاز) این قابلیت را دارا هستند.

۵- مطالعات عددی

مدلسازی انجام شده در بخش قبل به یک هاب انرژی نوعی اعمال شده و نتایج ارائه خواهند شد. هاب انرژی مورد بررسی مطابق شکل ۳ شامل یک واحد تولید همزمان برق و حرارت، یک ترانسفورماتور، یک کوره‌ی تولید حرارت و یک ذخیره‌ساز گاز است.

$$\text{Min } Z = \sum_j \pi_j \times \text{Cost}(j) \quad (13)$$

$$\text{subject to} \quad (14)$$

$$0 \leq Fw(i) \leq Fw_i^{\max} \quad (15)$$

$$A \times [P(i, j, t)] - SE(i, j, t) = L_{g,t} \quad (16)$$

$$E(i, j, 0) - E(i, j, N_t) = 0 \quad (17)$$

$$P(i, j, t) \geq 0 \quad (18)$$

$$E_{i,\min} \leq E(i, j, t) \leq E_{i,\max} \quad (19)$$

$$P_{k,\min} \leq P_c(k, j, t) \leq P_{k,\max} \quad (20)$$

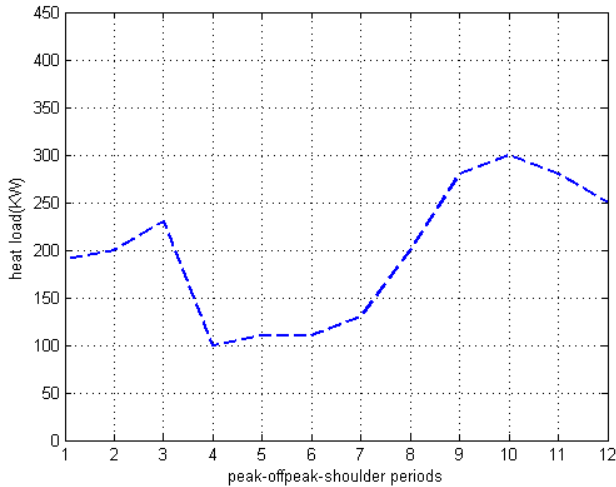
$$0 \leq v(i, k, t) \leq 1 \quad (20)$$

در نمودار شکل ۳ و روابط فوق داریم:

$P(i, j, t)$	انرژی ورودی از نوع i در دوره زمانی t و با رخداد سناریوی j
$Fw_1(i)$	میزان خرید از قرارداد بلندمدت حامل i و با اولویت اول تسویه
$Fw_2(i)$	میزان خرید از قرارداد بلندمدت حامل i و با اولویت دوم تسویه
$T_1(t)$	عدد باینری نشانگر حضور یا عدم حضور قرارداد ۱ در دوره t
$T_2(t)$	عدد باینری نشانگر حضور یا عدم حضور قرارداد ۲ در دوره t
$Fwt_1(i)$	متغیر ترکیبی از میزان قرارداد و متغیر T که حضور یا عدم حضور قرارداد را در دوره‌های مختلف زمانی نشان می‌دهد.
$\lambda_{Fw_1}(i)$	قیمت قرارداد بلندمدت حامل انرژی i و از نوع اول
$FC_{Fw}(i)$	هزینه ثابت انعقاد قرارداد
Fw_i^{\max}	حداکثر مقدار قابل خرید از قرارداد بلندمدت حامل انرژی i
$\lambda_p(i, j, t)$	قیمت حامل انرژی i ، در دوره t و سناریوی j در بازار انرژی
π_j	احتمال رخداد سناریوی j ام برای قیمت
A	ماتریس معادل تبدیل انرژی در هاب
S	ماتریس ذخیره‌سازی در هاب انرژی
$P_c(k, j, t)$	توان تولیدی مبدل k در دوره t و طی سناریوی j
$L_{g,t}$	میزان بار از نوع حامل انرژی g و در دوره t زمانی
$E(i, j, t)$	محتوای انرژی ذخیره‌ساز حامل i در سناریوی j و دوره t
$\dot{E}(i, j, t)$	تغییر انرژی ذخیره‌ساز حامل i در سناریوی j و دوره t
E_i^{\min}	محدودیت حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره‌سازی
E_i^{\max}	
N_t	آخرین دوره‌ی زمانی
$v_{i,k,t}$	ضریب تقسیم حامل ورودی i بین مبدل‌های k در دوره t
P_k^{\max}	محدودیت ظرفیت مبدل‌های انرژی
P_k^{\min}	

و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول ۵ در بخش ضمیمه، سناریوهای مورد بررسی نمایش داده شده‌اند. قابل ذکر است، مقدار بار بدون عدم قطعیت فرض شده است.

منحنی بار حرارتی مطابق شکل ۵ قابل نمایش است. همچنین مقدار متوسط بار الکتریکی هاب انرژی در هر یک از دوره‌های پرباری، میان‌باری و کم‌باری برای فصول مختلف سال در جدول ۲ نمایش داده شده است.

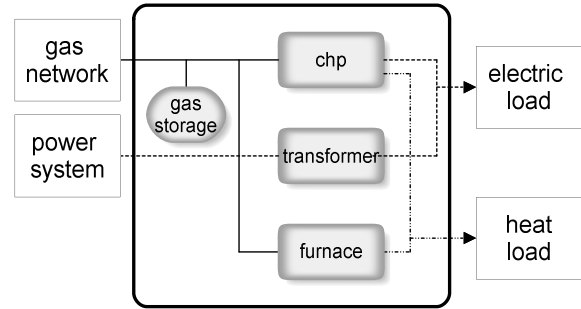


شکل (۵): منحنی بار حرارتی هاب انرژی بر اساس دوره‌های پرباری، میان‌باری و کم‌باری شبکه برق که به ترتیب و برای فصول متوالی رسم شده است

جدول (۲): بار الکتریکی هاب انرژی به تفکیک دوره‌های مصرف و فصول مختلف سال

کم‌باری (کیلووات)	میان‌باری (کیلووات)	پرباری (کیلووات)	
۱۱۰	۱۴۰	۱۷۰	بهار
۱۰۰	۱۶۰	۲۰۰	تابستان
۱۰۰	۱۲۰	۱۹۰	پاییز
۸۰	۱۰۰	۱۴۰	زمستان

فرض می‌شود در هر فصل ۱۶/۶٪ دوره‌ی پرباری، ۵۰٪ میان‌باری و ۳۳/۳٪ اوقات کم‌باری باشد. این مقادیر براساس تقسیم‌بندی شبانه روز به ۴ ساعت دوره‌ی پرباری، ۱۲ ساعت دوره‌ی میان‌باری و ۸ ساعت دوره‌ی کم‌باری است. علاوه بر اطلاعات بار، قیمت گاز و اطلاعات قراردادهای پیش‌رو برای خرید انرژی، به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند.



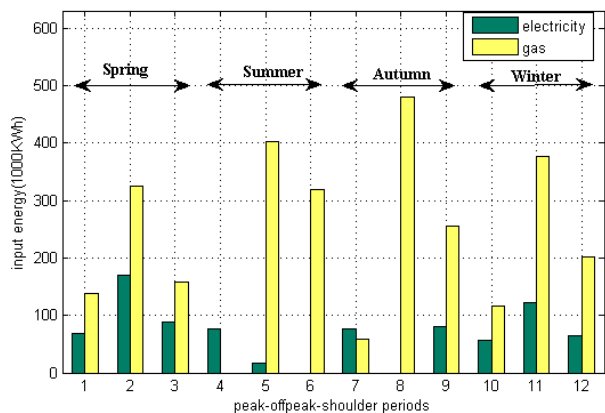
شکل (۴): هاب انرژی تشکیل شده از مبدل‌های مختلف انرژی و ذخیره‌ساز گاز

اطلاعات تجهیزات در جداول ۱ نمایش داده شده‌اند. قابل ذکر است هر مترمکعب گاز حاوی ۱۱/۳۶ کیلووات‌ساعت انرژی است.

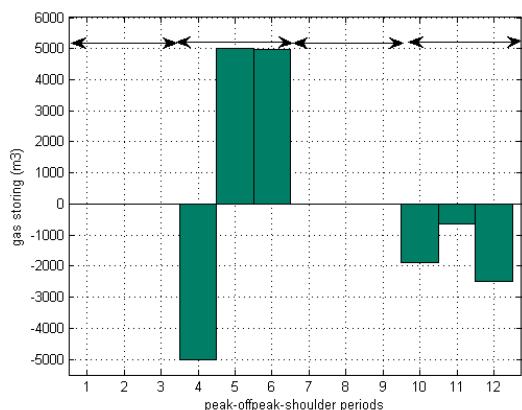
جدول (۱): ظرفیت و بازدهی تجهیزات مبدل انرژی، در هاب انرژی

مورد بررسی	
ترانسفورماتور	
بازده	۰/۹
ظرفیت (کیلووات)	۳۵۰
واحد تولید همزمان	
بازده الکتریکی	۰/۴
بازده حرارتی	۰/۳
ظرفیت (کیلووات)	۷۵۰
کوره حرارتی	
بازده	۰/۸
ظرفیت (کیلووات)	۴۰۰
ذخیره‌ساز گاز	
بازده ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی	۰/۹
ظرفیت ذخیره‌سازی (متر مکعب)	۵۰۰۰

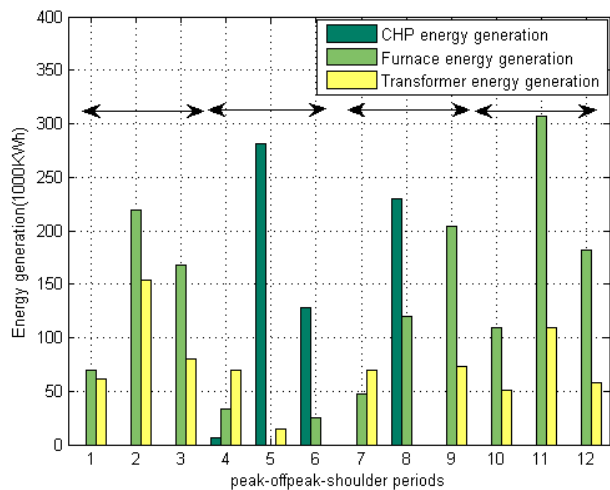
به منظور حل مسئله، بررسی‌هایی در یک دوره‌ی یک‌ساله صورت می‌گیرد. توجه به اینکه معمولاً قیمت گاز به طور فصلی تعیین شده و در طول فصل ثابت و مشخص است، تنها عدم قطعیت قیمت برق در بازار انرژی وارد محاسبات می‌گردد. بر این اساس دوره‌ی یک‌ساله به ۴ دوره‌ی سه‌ماهه (۴ فصل سال) که قیمت گاز در آنها مشخص است، تقسیم شده و دوره‌های فصلی نیز بر اساس منحنی تداومی بار الکتریکی شبکه، به سه دوره‌ی پرباری، میان‌باری و کم‌باری که طول این دوره‌ها معلوم است، تقسیم می‌شوند. همچنین عدم قطعیت قیمت برق به صورت سناریوهایی که بر اساس داده‌های قیمتی بازار نیویورک [۲۵] تولید شده است، مدل‌سازی می‌شود. در نهایت با بهره‌گیری از روش کاهش سناریوی مبتنی بر خوشه‌بندی k_means ، ۳۰ سناریو (از بین ۱۰۰۰ سناریوی قیمتی) که هر یک در بردارنده‌ی قیمت برق در دوره‌های ۱۲ گانه‌ی سال هستند، تولید شده



شکل (۷): گاز و برق ورودی هاب در سناریوی ۱۴، با حل مسئله بهینه‌سازی



شکل (۸): راهبرد ذخیره‌سازی گاز با رخداد سناریوی شماره ۱۴



شکل (۹): میزان تولید انرژی مبدل‌ها در دوره‌های مختلف زمانی و در سناریوی ۱۴

با توجه به میزان انرژی خریداری شده از قراردادهای زمانی و پیک، و نظر به اینکه افزایش انرژی الکتریکی ورودی به هاب از مقدار تعیین شده در

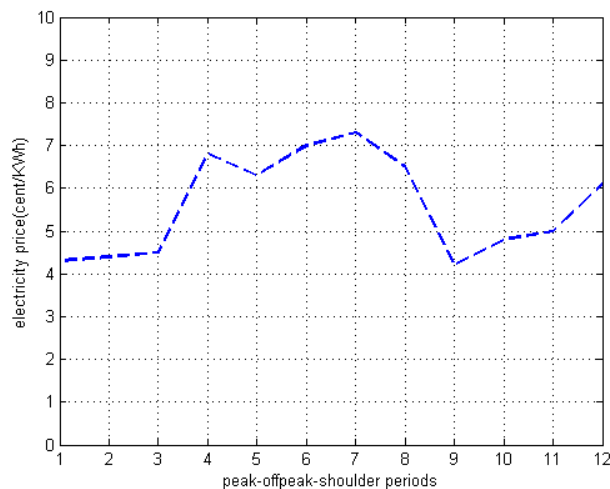
جدول (۳): قیمت گاز در فصول مختلف سال (¢/kWh)

زمستان	پاییز	تابستان	بهار	قیمت گاز
۴/۵	۴	۳/۵	۳/۸	

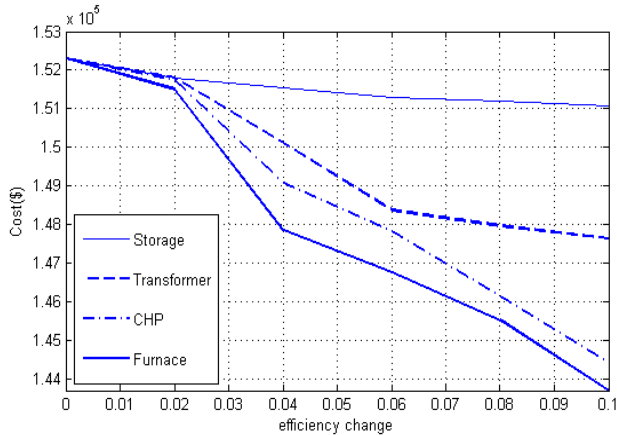
جدول (۴): قراردادهای بلندمدت خرید برق

شماره قرارداد	حداکثر مقدار (kW)	دوره‌های اعتبار قرارداد	قیمت قرارداد (¢/kWh)
۱	۱۰۰	تابستان - پاییز	۵
۲	۱۵۰	ساعات پرباری سال	۵

قابل ذکر است، قراردادهای به صورت بلند مدت برای مدت یک سال بوده و مقادیر توان ذکر شده در جدول ۴ برای هر ساعت دوره‌ی حضور معتبر هستند. همچنین اولویت تسویه حساب با قرارداد اول است. با حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی با استفاده از مقادیر داده شده در جداول فوق و بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته، حداقل هزینه سالانه‌ی تامین بارهای حرارتی و الکتریکی، $۱۵۲/۳۰۱$ هزار دلار خواهد بود. همچنین میزان خرید از قراردادهای اول و دوم به ترتیب $۶۱/۱$ و ۱۵۰ کیلووات خواهد بود. نتایج بهره‌برداری شامل میزان ذخیره‌سازی گاز در دوره‌های مختلف، مقدار گاز و برق ورودی هاب و سهم هر یک از مبدل‌ها در تولید انرژی به عنوان نمونه و برای یکی از محتمل‌ترین سناریوها (سناریو ۱۴) ارائه شده است. بر این اساس منحنی قیمت برق در این سناریو به صورت شکل ۶ نمایش داده شده است. هزینه تامین بار در این سناریو $۱۵۰/۷۸۰$ هزار دلار می‌باشد. شکل ۷ مقادیر حاصله برای گاز و برق ورودی هاب را بر حسب کیلووات‌ساعت در دوره‌های مختلف، در این سناریو نمایش می‌دهد. همچنین راهبرد ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی توسط ذخیره‌ساز گاز برای دوره‌های مختلف یک‌سال مطابق شکل ۸ نمایش داده شده است. شکل ۹ نیز، میزان تولید انرژی توسط هر یک از مبدل‌ها در دوره‌های مختلف را برای سناریوی ۱۴ نمایش می‌دهد.



شکل (۶): روند قیمتی برق در سناریوی شماره ۱۴



شکل (۱۰): میزان تاثیر افزایش بازدهی تجهیزات مختلف در کاهش هزینه‌های سالیانه

مطابق شکل ۱۰، ملاحظه می‌گردد، موثرترین تجهیز در کاهش هزینه‌ها کوره حرارتی می‌باشد، به نحوی که افزایش ۱۰ درصدی در بازده آن کاهش ۵/۶٪ (معادل ۸/۶ هزار دلار) را در هزینه‌های سالانه در پی دارد. تاثیر دیگر تجهیزات نیز در این شکل مشخص است. قابل ذکر است که نمودار فوق به‌تنهایی معیار مناسبی برای توسعه‌ی تجهیزاتی هاب نمی‌باشد و تنها نمایانگر موثرترین تجهیزات در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری است. هزینه‌ی ارتقای کیفیت هر یک از تجهیزات نیز باید سنجیده شده و بر مبنای هر دو هزینه تصمیم‌گیری شود.

۶- نتیجه

در این مقاله روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های پیش‌بینی قیمت در مورد یک هاب انرژی با بارهایی از انواع حامل‌های انرژی مورد استفاده قرار گرفته و تغییراتی در مدل‌های پیشین به منظور ساده‌سازی روند محاسباتی در مسایل بزرگ و همچنین امکان بررسی پدیده‌هایی همچون پیری تجهیزات اعمال شد. با حل مسئله بهینه‌سازی که کمینه کردن هزینه‌های تامین بار در یک دوره‌ی زمانی یک‌ساله برای یک هاب نوعی انرژی بود، راهبرد خرید انرژی از قراردادهای بلندمدت و بازار انرژی تعیین شده و نتایج، برای محتمل‌ترین سناریو مورد تحلیل قرار گرفت. به‌علاوه، بهبود بازدهی تجهیزات، مورد بررسی قرار گرفته و موثرترین تجهیزات در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری تعیین شد.

از مهم‌ترین متغیرهای مسئله که با حل مسئله بهینه‌سازی تعیین شد، میزان خرید انرژی از قراردادهای بلند مدت بود. اولویت قراردادها در فرایند تسویه حساب به عنوان بخشی که در قراردادها تعیین شده و مشخص است، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از قراردادها تنها در جهت کاهش متوسط هزینه‌های سالانه، استفاده شد و این درحالیست که قراردادها تاثیر به‌سزایی در کاهش ریسک دارند.

قراردادها در هر دوره‌ی زمانی، با قیمت بازار تسویه خواهد شد، قابل پیش‌بینی است که با اوج گرفتن قیمت برق در تابستان و پاییز (مطابق سناریوی ۱۴) و بالا بودن مقدار بار الکتریکی در این دو فصل، واحد تولید همزمان بخش زیادی از بار الکتریکی را در دوره‌های میانباری و کم‌باری تامین کند. زیرا در این دوره‌ها تنها به میزان ۶۱ کیلووات قرارداد بلندمدت زمانی وجود دارد که برای تامین بار الکتریکی کافی نیست. در مقابل ملاحظه می‌شود که در دوره‌های پرباری، تقریباً تمام بار الکتریکی، با ورود مستقیم انرژی از شبکه برق و به قیمت قراردادهای بلند مدت تامین می‌شود. در فصل‌های زمستان و بهار به دلیل بالا بودن قیمت گاز و پایین بودن قیمت برق (مطابق جدول ۳ و نمودار شکل ۶) توجیهی برای تامین بار الکتریکی به‌وسیله‌ی واحد تولید همزمان وجود ندارد. در این دو فصل، بار الکتریکی تماماً از شبکه برق و بار حرارتی به‌طور کامل توسط کوره‌ی حرارتی تامین می‌گردند. توجه به این نکته مهم است که هر قدر در دو فصل میانی سال افزایش مقدار قراردادها مناسب به نظر می‌رسد، در دو فصل دیگر سال به دلیل افت قیمت برق در بازار به مقداری کمتر از قیمت قراردادها، موجب تحمیل هزینه‌های اضافی خواهد شد. در واقع با حل مسئله بهینه‌سازی برای حالت‌های مختلف قیمت برق در بازار، مقدار بهینه‌ی خرید از بازار به عنوان یکی از متغیرهای مسئله تعیین شده است.

مطابق شکل ۸، که میزان ذخیره‌سازی گاز در دوره‌های مختلف را نمایش می‌دهد، ملاحظه می‌گردد که در ساعت‌های کم‌باری و میان‌باری فصل تابستان، گاز ذخیره شده و در ساعت‌های پرباری برای تامین مصارف حرارتی توسط کوره حرارتی به کار گرفته شده است. همچنین در این دوره با توجه به قیمت پایین گاز، ذخیره‌سازی صورت گرفته و در فصل زمستان که قیمت گاز بالاست مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۱- تحلیل حساسیت هزینه‌ها به بازدهی تجهیزات مختلف

بهبود بازدهی تجهیزات تولید و ذخیره‌سازی انرژی در جهت کاهش هزینه‌ها موثر است، اما افزایش یکسان در بازدهی تجهیزات مختلف نتیجه‌ی یکسانی در کاهش هزینه‌ها ندارد و مناسب است موثرترین تجهیزات در کاهش هزینه‌ها مورد شناسایی قرار گیرند.

با توجه به طبیعت غیرخطی مسئله، نتایج تنها برای نقطه کار مشخصی معتبر بوده و با تغییر نقطه کار باید تحلیل جدیدی صورت بگیرد. برای سنجش تاثیر بهبود بازدهی بر کاهش هزینه‌ها، هر بار مسئله با تغییر کوچکی در بازدهی یکی از تجهیزات در مراحل مختلف حل شده و میزان تغییر هزینه‌ها تعیین شده است. با انجام این روند نمودار شکل ۱۰، استخراج می‌گردد.

روش ارزیابی اقتصادی ارائه شده در این مقاله، به‌طور بالقوه توانایی دربرگیری هر گونه عدم قطعیت را که قابل مدل‌سازی در قالب سناریوهای مختلف باشد، داراست. در اینجا عدم قطعیت قیمت به‌عنوان یکی از این موارد غیرقطعی مورد بررسی قرار گرفت. این روش می‌تواند در تعیین بهترین آرایش ساختاری یک هاب انرژی از بین ساختارهای منتخب، در حالیکه از جامعیت بالایی در دربرگیری جوانب برخوردار است و پیچیدگی محاسباتی بالایی ندارد، مورد استفاده قرار گیرد.

ضمایم

جدول (۵): سناریوهای مورد بررسی برای قیمت برق در بخش مطالعات عددی

ω	π(ω)	بهار			تابستان			پاییز			زمستان		
		قیمت گاز = ۳/۸ (€/kWh)			قیمت گاز = ۳/۵ (€/kWh)			قیمت گاز = ۴ (€/kWh)			قیمت گاز = ۴/۵ (€/kWh)		
۱	۰/۰۴۲۵	۶	۵/۸	۶/۵	۷	۴/۶	۶/۹	۵	۶	۵/۵	۶/۸	۵	۴
۲	۰/۰۴۲	۶/۵	۷	۷	۶/۹	۴/۴	۵	۵/۵	۴/۵	۶/۸	۵	۵/۴	۶
۳	۰/۰۳۱۵	۷	۴	۶/۹	۵	۵/۷	۵/۵	۶/۸	۶/۸	۴	۶	۴/۷	۵
۴	۰/۰۰۵	۶/۹	۵/۱	۵	۵/۵	۵/۱	۶/۸	۴	۵	۶	۵	۵/۵	۵/۴
۵	۰/۰۲۳۵	۵	۴/۳	۵/۵	۶/۸	۶/۳	۴	۶	۵/۳	۵	۷	۴/۵	۴/۷
۶	۰/۰۵۱	۵/۱	۴/۹	۵/۲	۵/۳	۴/۸	۵/۴	۶/۱	۵/۷	۶/۳	۶/۳	۶/۶	۶/۴
۷	۰/۰۴	۴/۱	۶/۹	۴/۷	۶/۷	۶/۸	۵/۲	۴/۲	۴	۵/۶	۵/۷	۴/۷	۷
۸	۰/۰۵۶۵	۶/۸	۵	۴	۶	۴/۵	۵	۵	۴	۵/۵	۶/۸	۴/۴	۴
۹	۰/۰۳	۶	۴/۹	۶/۵	۵	۵/۹	۵/۵	۶/۸	۶/۹	۴	۷	۶	۴/۷
۱۰	۰/۰۱۹	۷	۴/۶	۶/۹	۶	۶/۶	۶/۵	۵/۲	۵/۶	۴/۲	۵	۶/۵	۷
۱۱	۰/۰۴۴۵	۴/۷	۳/۵	۶/۷	۶	۳/۶	۵	۵/۵	۶	۶/۸	۶	۷	۶/۵
۱۲	۰/۰۰۴	۶/۸	۷	۴	۶	۷	۶/۵	۷	۷	۶/۹	۵	۶/۸	۵/۵
۱۳	۰/۰۱۴	۶/۹	۴/۲	۵	۵/۵	۴/۷	۶/۸	۵/۳	۴/۵	۵/۴	۶/۱	۵/۴	۴
۱۴	۰/۰۷۳	۴/۳	۴/۴	۴/۵	۶/۸	۶/۳	۷	۷/۳	۶/۵	۴/۲	۴/۸	۵	۶/۱
۱۵	۰/۰۴۵۵	۵/۳	۵/۴	۵	۵/۹	۵/۴	۶/۸	۴	۵/۴	۴/۲	۴/۳	۵/۴	۴/۹
۱۶	۰/۰۲۵	۵/۶	۵/۶	۵/۷	۵/۸	۴/۷	۶/۵	۶/۷	۶/۸	۵/۴	۵	۷	۶/۶
۱۷	۰/۰۳۴	۴	۵/۲	۴/۴	۴/۲	۵/۱	۴/۶	۴/۸	۶/۱	۵	۵/۸	۶/۴	۶/۷
۱۸	۰/۰۵۷	۶/۹	۵/۹	۶/۸	۶/۷	۵/۸	۶/۵	۶/۴	۵/۷	۶/۳	۶/۲	۵/۶	۶/۱
۱۹	۰/۰۴۷	۷	۴/۹	۴	۶	۵	۵	۵/۶	۶/۹	۵/۳	۵/۵	۷	۵/۴
۲۰	۰/۰۵۷۵	۴/۹	۵/۵	۴/۱	۶/۹	۶/۵	۶/۱	۵/۹	۴/۵	۵/۱	۶/۵	۵/۵	۴/۵
۲۱	۰/۰۰۹۵	۴/۷	۶/۷	۴/۸	۵/۸	۵/۷	۶/۲	۴/۱	۶/۱	۴/۹	۷	۴/۱	۶/۸
۲۲	۰/۰۲۶۵	۶/۵	۴/۳	۶/۷	۵/۴	۶/۳	۵	۴	۵/۳	۴/۲	۴/۶	۶/۶	۴/۸
۲۳	۰/۰۱۵۵	۶/۷	۶	۶/۵	۶/۴	۴/۸	۶/۳	۴	۷	۴/۲	۴/۳	۶/۹	۴/۹
۲۴	۰/۰۲۵	۴/۴	۴/۴	۴/۲	۴/۶	۵/۴	۴/۸	۶/۸	۷	۶/۷	۶/۵	۴/۳	۶/۴
۲۵	۰/۰۱۴	۴/۸	۵/۴	۵	۵/۸	۶/۴	۶/۷	۷	۴/۲	۴	۶	۶/۷	۵
۲۶	۰/۰۲۵	۵/۹	۴/۴	۵/۱	۶/۵	۶/۹	۴/۵	۵/۳	۷	۵	۵/۹	۶/۴	۶/۸
۲۷	۰/۰۴۵	۵	۵/۴	۵/۶	۵/۳	۵/۵	۵/۵	۵/۳	۶/۵	۵	۵/۹	۴/۱	۶/۸
۲۸	۰/۰۲۶۵	۷	۶/۷	۶/۹	۵	۷	۵/۵	۶/۸	۶	۴	۶	۶	۵
۲۹	۰/۰۴۱	۶/۷	۴/۱	۵/۴	۵	۴/۲	۶/۶	۶/۷	۴/۳	۵/۴	۵	۴/۴	۴
۳۰	۰/۰۲۹۵	۴	۴/۵	۴/۲	۴/۳	۴/۶	۴/۹	۷	۵/۵	۴	۶	۶/۹	۵

CCHP,” *Energy and Power Engineering*, vol. 3, no. 5, 2011.

- [18] A. Shahmohammadi, M. M. Dalvand, M. S. Ghazizadeh, and A. Salemnia, “Energy hubs’ structural and operational linear optimization with energy storage elements,” in *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on*, 2011, pp. 1–6.
- [19] F. Kienzle, P. Ahcin, and G. Andersson, “Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty,” *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 2, pp. 194–202, 2011.
- [20] M. Geidl and G. Andersson, “Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 16, no. 5, pp. 463–477, 2006.
- [21] M. Geidl and G. Andersson, “A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow,” in *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, 2005, pp. 1–7.
- [22] M. Geidl and G. Andersson, “Optimal power flow of multiple energy carriers,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 1, pp. 145–155, 2007.
- [23] M. Geidl, *Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems*, vol. 68, 2007.
- [24] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*, vol. 153. Springer, 2010.
- [25] “FERC: Electric Power Markets - NYISO Daily Report Archives.” [Online]. Available: <http://www.ferc.gov/market-oversight/mkt-electric/new-york/nyiso-archives.asp>.

زیر نویس ها

¹ Energy Hub

² Robust Optimization

مراجع

- [1] D. Hinrichs, “Cogeneration,” *Encyclopedia of Energy*, vol. 1, pp. 581–594, 2004.
- [2] J. Hernández-Santoyo and A. Sánchez-Cifuentes, “Trigeneration: an alternative for energy savings,” *Applied Energy*, vol. 76, no. 1, pp. 219–227, 2003.
- [3] G. Koeppel and G. Andersson, “The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply,” in *Proc. of 6th World Energy System Conference*, 2006.
- [4] G. Koeppel and G. Andersson, “Reliability modeling of multi-carrier energy systems,” *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 235–244, 2009.
- [5] P. M. Pardalos and M. G. Resende, *Handbook of applied optimization*, vol. 1. Oxford University Press Oxford, 2002.
- [6] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons, 2012.
- [7] K. D. Timmerhaus, M. S. Peters, and R. E. West, “Plant design and economics for chemical engineers,” *Chemical Engineering Series*, 1991.
- [8] M. R. Gent and J. W. Lamont, “Minimum-emission dispatch,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, no. 6, pp. 2650–2660, 1971.
- [9] J. H. Talaq, F. El-Hawary, and M. E. El-Hawary, “Minimum emissions power flow,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 1, pp. 429–435, 1994.
- [10] A. J. del Real, A. Arce, and C. Bordons, “Optimization strategy for element sizing in hybrid power systems,” *Journal of Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 315–321, 2009.
- [11] A. Parisio, C. Del Vecchio, and A. Vaccaro, “A robust optimization approach to energy hub management,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 98–104, 2012.
- [12] A. Parisio, C. Del Vecchio, and G. Velotto, “Robust Optimization of operations in energy hub,” in *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, 2011, pp. 4943–4948.
- [13] P. Booij, V. Kamphuis, O. van Pruissen, and C. Warmer, “Multi-agent control for integrated heat and electricity management in residential districts,” *ATES@ AAMAS*, vol. 13, pp. 6–10, 2013.
- [14] A. Sharif, A. Almansoori, M. Fowler, A. Elkamel, and K. Alrafea, “Design of an energy hub based on natural gas and renewable energy sources,” *International Journal of Energy Research*, 2013.
- [15] M. Moeini-Aghaie, P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Abbaspour, “Multiagent Genetic Algorithm: An Online Probabilistic View on Economic Dispatch of Energy Hubs Constrained by Wind Availability,” 2013.
- [16] A. Sheikhi, A. M. Ranjbar, and H. Oraee, “Financial analysis and optimal size and operation for a multicarrier energy system,” *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 71–78, 2012.
- [17] A. Sheikhi, A. M. Ranjbar, H. Oraee, and A. Moshari, “Optimal operation and size for an energy hub with