Archive of SID

بهبود روش‌های بهره‌برداری از یک نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی و سیستم‌های خبرهٔ فازی

سیدعلی ترابی[۱*] محسن شایگان [۲] و محمد محمدی[۳]

۱. دانشیار دانشکدهٔ مهندسی صنایع دانشگاه تهران

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه خوارزمی تهران

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه خوارزمی تهران

(تاریخ دریافت ۹۳/۰۳/۲۴ ـ تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۳/۱۱/۰۷ ـ تاریخ تصویب ۹۴/۳/۱۸)

چکیده

در این مقاله، روشی جدید برای بهره‌برداری از یک نیروگاه سیکل ترکیبی ارائه شده است. در حالت بهره‌برداری عادی از نیروگاه، دو پارامتر بازدهی و ریسک اهمیت بسیاری دارند. در وضعیت فعلی، مقدار تولید درخواستی از نیروگاه از طرف مرکز کنترل (مدیریت و راهبری شبکهٔ برق ایران) اعلام می‌شود و مرکز کنترل و بازار برق و اپراتورهای نیروگاه‌ها به‌صورت مساوی این مقدار درخواستی را بین واحدها توزیع می‌کنند که از نظر بازدهی و ریسک، اقتصادی و بهینه نیست. در روش پیشنهادی، داده‌های لحظه‌ای واحدهای نیروگاه، پس از فازی‌شدن وارد سیستم خبرهٔ فازی می‌شوند. سپس با توجه به شرایط واحدها، دو مقیاس به‌عنوان بازدهی و ریسک برای هر واحد، مشخص و به‌صورت غیرفازی‌شده در خروجی سیستم خبره ارائه می‌شود. سپس، این پارامترها در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه به‌عنوان ضرایب معادله‌ها به‌کار می‌روند و پس از حل مدل ریاضی، بهترین ترکیب ممکن از توزیع بار واحدهای نیروگاهی، براساس بازدهی و ریسک آن‌ها به برنامه‌ریز ارائه می‌شود. درنهایت، به‌کمک مثالی عددی، میزان تأثیر و کارایی روش پیشنهادی در عمل بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ریاضی، بهره‌برداری نیروگاه، روش حدی تقویت‌شده، سیستم‌های پشتیبان تصمیم، سیستم‌های خبرهٔ فازی، سیستم‌های مبتنی‌بر قاعده.

مقدمه

در زمینهٔ انواع فرایند تولید انرژی الکتریکی، روش ها و فناوری های متفاوت و متنوعی توسعه یافته اند. درنتیجه، عملیات بهره‌برداری از آن‌ها نیز باید به روش‌های خاص هریک صورت گیرد. بهره برداری از نیروگاه ها شامل عملیات و مانورهای بسیار زیاد و گسترده و هماهنگی عملیات است، اما به طورکلی، در شرایط بهره برداری نرمال، هدف، اجرا و کنترل فرایندها به نحوی است که بازده فرایند تولید انرژی الکتریکی تا حد ممکن زیاد باشد و درعین حال، کل فرایند به‌صورت ایمن و مطمئن و با حداقل هزینه و آلودگی محیط زیست انجام گیرد.

در فرایند حساس و پیچیدهٔ تولید انرژی الکتریکی، علاوه‌بر اینکه پارامترهای یک طراحی پیشرفته و بهینه برای تجهیزات- که از طرف سازنده رعایت می شود- در بازدهی و ایمنی تولید نقش بسیار مهمی دارد، روش بهره برداری و استفاده از فرایند نیز در این بازدهی و ایمنی (پایین‌بودن ریسک) از اهمیت بسیار برخوردار است. درحال حاضر، علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد در سیستم‌های کنترل نیروگاه‌ها و اتوماسیون فرایندها، هنوز در بسیاری از موارد، تصمیم ها از سوی شخص بهره‌بردار یا سرپرست به‌صورت سلیقه‌ای یا تجربی اتخاذ می شود که در آن بی تردید، در شرایطی با محدودیت زمانی یا فنی، لزوم یک سیستم پشتیبان و درعین حال هوشمند و خبره برای کمک به بهره‌بردار احساس می‌شود.

تمامی پارامترهای مؤثر بر هزینه و همچنین آلودگی محیط زیست و حتی ایمنی و اطمینان، درهرصورت به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر دو پارامتر مهم بازدهی و ریسک

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۲۶۷

Email: satorabi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیرگذارند. البته بازدهی به‌طور مستقیم قابل‌اندازه‌گیری است، اما این امر به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، مقیاس ریسک به‌صورت صفر تا صد تعریف شده است و مقدار آن نیز با توجه به دیدگاه‌های افراد خبره به صورت احتمال آسیب به واحد یا ازدست‌رفتن تولید در شرایط مختلف تعیین شده است؛ برای مثال، افزایش بازدهی نشان‌دهندهٔ کاهش مصرف سوخت به‌ازای یک سطح تولید معین است که علاوه‌بر کاهش هزینه، به‌علت مصرف سوخت کمتر در آن، آلاینده‌های زیست‌محیطی کمتری نیز منتشر می‌شود. همچنین کاهش سطح تولید واحدی- که مثلاً لرزش‌های[1] بیشتری در یاتاقان دارد- درواقع، دورشدن از شرایط ریسک است که علاوه‌بر کاهش پارامتر ریسک- که در مدل به صورت یک مقیاس تعریف شده است- در کاهش هزینه‌های درازمدت (بابت تعمیر و رفع آسیب های واردشده به یاتاقان‌ها بر اثر لرزش در این مثال) و نیز هزینه‌های کوتاه مدت (بابت کاهش احتمال خروج اضطراری واحد[2] و ازدست‌دادن تولید و درواقع درآمد) تأثیر بسیاری دارد.

پارامتر ریسک در پژوهش حاضر با توجه به مطالعهٔ فرایند تولید انرژی الکتریکی، به صورت ریسک توقف فرایند[3] به‌کار می‌رود. فرایند نیروگاه سیکل ترکیبی، خود متشکل از چندین زیرفرایند است و آن‌ها نیز ممکن است از زیرفرایندهای دیگر و درنهایت، از تجهیزات تشکیل شده باشند. به‌طورکلی، برای کاهش ریسک توقف تولید، از تجهیزات پشتیبان استفاده می شود؛ برای مثال، اگر در زیرفرایندی به دستگاه پمپ نیاز باشد، از همان پمپ، دو دستگاه در فرایند نصب می شود که یک دستگاه به صورت نرمال در مدار و دیگری آماده است و درصورت بروز اشکال در پمپ اول، پمپ دوم بلافاصله به‌صورت اتوماتیک در مدار قرار می‌گیرد.

حال اگر یک تجهیز یا فرایند پشتیبان دچار اشکال باشد، ریسک (احتمال) توقف فرایند افزایش می‌یابد و درصورت بروز اشکال در تجهیز یا زیرفرایند مورد نظر، کل فرایند متوقف می‌شود و این به‌معنای بروز حادثه (فنی) است. بدین‌ترتیب، با توجه به مدت توقف، تا بازیابی مجدد فرایند یا تجهیز و بازگشت شرایط به حالت نرمال، زیان مالی نیز متوجه کل مجموعه می‌شود.

در پژوهش حاضر، امکان تلفیق یک سیستم خبره و مدل برنامه‌ریزی ریاضی، برای ایجاد یک سیستم درجهت پشتیبانی از تصمیم‌گیری بهره‌بردار در فرایند تولید انرژی الکتریکی در یک نیروگاه سیکل ترکیبی بررسی می‌شود. فرض بر این است که با طراحی چنین سیستمی بتوان در شرایط مختلف، بازدهی را افزایش و ریسک را کاهش داد. میزان تغییر در این دو پارامتر نیز در یک مطالعهٔ موردی در نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان، بررسی و تحلیل می‌شود.

مرور ادبیات

در این پژوهش، برای بهینه سازی تولید واحدهای نیروگاه سیکل ترکیبی، از تلفیق یک سیستم خبره و یک مدل ریاضی استفاده شده است؛ به‌این ترتیب که بخشی از پارامترهای مدل ریاضی در سیستم خبره- که به صورت فازی است- تعیین شده است. با تکمیل مدل ریاضی و حل آن، جواب‌های بهینه به‌دست می‌آید که مقدار تولید تخصیص‌یافته به هر واحد تولید انرژی الکتریکی است. درنهایت، با اعمال این مقادیر در فرایند، علاوه‌بر رسیدن به بیشترین بازدهی ممکن و کمترین ریسک، رعایت دستورالعمل‌های ارائه‌شده برای بهره‌برداری و نیز دستورالعمل های سازنده تضمین می‌شود. این شیوه، دراصطلاح، برنامه‌ریزی برمبنای قوانین[4] نام دارد.

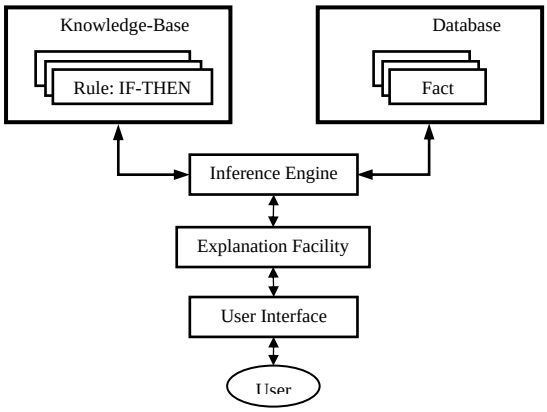
پروفسور فیگنبام[5] [۱]، یکی از پیشکسوتان فناوری سیستم های خبره، تعریفی از سیستم خبره دارد: «برنامه‌ای کامپیوتری و هوشمند که از دانش و روش های استنتاج برای حل مسائلی استفاده می کند که به‌دلیل دشواری، به تجربه و مهارت انسان نیاز دارند.» از نظر ساختار داخلی، سیستم خبره از دو بخش تشکیل می شود. بخش اول پایگاه دانش[6] است. این پایگاه، حاوی دانشی است که بخش دوم، یعنی موتور استنتاج[7]، به‌کمک آن نتیجه‌گیری می‌کند.

در شکل ۱، ساختار یک سیستم خبره مشاهده می‌شود. برای اطلاعات بیشتر به [۲] مراجعه کنید.

تعاریف جدید سیستم های خبره، آن را سیستمی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران[8] در موقعیت‌های نیمه‌ساختاریافته معرفی می‌کند. DSS به‌عنوان یک سیستم در کنار تصمیم‌گیران، برای افزایش قابلیت آن‌ها درنظر گرفته می‌شود، اما جایگزین قضاوت آن‌ها نمی‌شود. این سیستم ها در جاهایی به‌کار می‌روند که نیاز به قضاوت وجود دارد یا تصمیم‌گیری به‌صورت کامل به‌وسیلهٔ الگوریتم قابل‌انجام نیست.

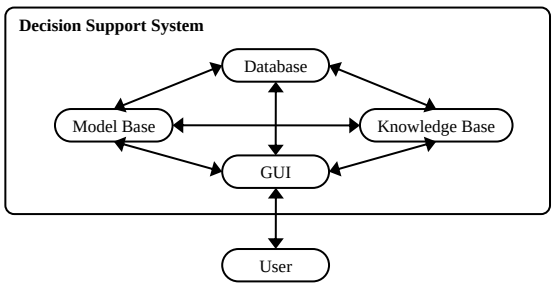
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. اجزای یک سیستم خبرهٔ مبتنی بر قاعده

برای آگاهی بیشتر از سیستم های پشتیبان تصمیم، به منابع [۳]، [۴]، [۵] و [۶] مراجعه کنید (شکل ۲).



شکل ۲. ساختار یک سیستم پشتیبان تصمیم

نتیجهٔ پژوهش حاضر، تولید و ارائهٔ یک سیستم پشتیبان تصمیم است که با توجه به نوع مسئله، شامل تمام یا بعضی از اجزای مهم سیستم‌های DSS است. در مسئلهٔ مورد پژوهش، هدف، بیشینه‌کردن بازدهی و کمینه‌کردن ریسک در بهره برداری از واحدهای نیروگاه سیکل ترکیبی است که مسئله‌ای دوهدفه است و کل تولید مورد نیاز، به‌نسبت مشخصی به واحدهای نیروگاه تخصیص داده می شود؛ به طوری‌که بازدهی کل مجموعه، ماکزیمم و ریسک، مینیمم شود. در بسیاری از مقاله‌ها و کتاب‌ها از این مسئله به‌عنوان مشارکت واحدها[9] نام برده شده است.

برای حل این مسئله، در رویکرد جمع وزنی، از بردار وزن‌ها برای تجمیع توابع هدف در یک تابع استفاده می‌شود که این رویکرد برای مسائلی که فضای جواب غیرمحدب باشد، دچار اشتباه می شود. در کنار رویکرد جمع وزنی، شاید روش ε-Constraint معروف‌ترین روش برای حل مسائل بهینه سازی چندمعیاره باشد. در این روش، توابع هدف تجمیع نمی شوند؛ بلکه یکی از توابع هدف اصلی باقی می‌ماند و بقیه به محدودیت‌های مسئله منتقل می‌شوند. این رویکرد را هیمز و همکاران (۱۹۷۱) معرفی کردند و مباحث تکمیلی آن را هیمز و چانکونگ (۱۹۸۴) ارائه دادند که در [۷] به‌تفصیل آمده است. مطابق توضیحات [۸]، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفهٔ زیر را درنظر بگیرید:

$$Max\left(f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \ldots, f_p(\mathbf{x})\right) \quad (۱)$$

.S.t

$$\mathbf{x} \in S \quad (۲)$$

که $\boldsymbol{x}$ بردار متغیرهای تصمیم، $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \ldots, f_p(\mathbf{x})$ تعداد p عدد تابع هدف و S فضای شدنی مسئله است.

در روش ε-Constraint، یکی از توابع هدف ماکزیمم می‌شود؛ درحالی‌که سایر توابع هدف به‌عنوان محدودیت به‌کار می‌روند و به بخش محدودیت های مسئله منتقل می شوند. مطابق [۹] و [۱۰] معادله‌های زیر به‌دست می‌آیند:

$$Max\ f_1(\mathbf{x}) \quad (۳)$$

.S.t

$$f_2(\mathbf{x}) \geq e_2 \quad (۴)$$

$$f_3(\mathbf{x}) \geq e_3 \quad (۵)$$

.

.

$$f_p(\mathbf{x}) \geq e_p \quad (۶)$$

$$\mathbf{x} \in S \quad (۷)$$

حال با تغییرهای پارامتری سمت راست توابع هدف محدودشده (e_i)، جواب‌های کارای مسئله به‌دست می‌آید.

اشکال روش ε-Constraint استاندارد در کارایی جواب های پارتوی آن است. به‌عبارت دیگر، تضمینی برای کارایی جواب‌های روش ε-Constraint استاندارد وجود ندارد و ممکن است جواب‌های غیرکارا نیز تولید شوند. اگر یک جواب پارتوی دیگر وجود داشته باشد که حداقل یک تابع هدف را بدون بدترکردن سایر توابع هدف بهبود دهد، جواب پارتوی اولیه غیرکاراست. براساس بررسی‌های [۱۱]، با این دیدگاه که تمامی توابع هدف باید ماکزیمم شوند، بدون ازدست‌دادن کلیت مسئله، هرچه مقدار بیشتری برای توابع هدف ارائه شود، مطلوب‌تر است.

www.SID.ir

Archive of SID

درواقع، روش ε-Constraint استاندارد، اغلب جواب ها را به‌صورت $f_2 = e_2, f_3 = e_3, .., f_p = e_p$ ارائه می دهد. اگرچه تمامی محدودیت های معادلهٔ تبدیل شدهٔ روش ε-Constraint ارضا می‌شوند، جواب‌ها ممکن است کارا نباشند. برای رفع این اشکال در [۱۲] روش ε-Constraint تقویت‌شده ارائه شد که با استفاده از آن، ابتدا محدودیت های نامساوی توابع هدف با افزودن متغیرهای اضافی مثبت یا متغیرهای کمبود، به محدودیت‌های مساوی تبدیل می شوند. سپس تابع اصلی هدف با جمع متغیرهای اضافی تکمیل می‌شود؛ بنابراین، فرمول روش ε-Constraint تقویت‌شده به‌صورت زیر است:

$$Max\ \{f_1(\mathbf{x}) + \delta \times (s_2 + s_3 + \cdots + s_p)\} \quad (۸)$$

.S.t

$$f_2(\mathbf{x}) = e_2 + s_2 \quad (۹)$$

$$f_3(\mathbf{x}) = e_3 + s_3 \quad (۱۰)$$

.

.

$$f_p(\mathbf{x}) = e_p + s_p \quad (۱۱)$$

$$\mathbf{x} \in S, s_i \in R^+ \quad (۱۲)$$

که δ عددی کوچک معمولاً بین 10^{-3} و 10^{-6} است [۸]. محدودیت‌های مساوی معادلهٔ فوق (معادله‌های ۹ تا ۱۱) با محدودیت‌های نامساوی روش استاندارد (معادله‌های ۴ تا ۶) معادل‌اند.

درهرحال، در روش استاندارد، متغیرهای اضافی s_i صفر درنظر گرفته می‌شوند و جواب‌ها به‌صورت $f_i = e_i$ ارائه می شوند. از سوی دیگر، در روش ε-Constraint تقویت‌شدهٔ تابع هدف اصلی با مجموع متغیرهای اضافی تکمیل می شود. این سازوکار، از تولید جواب های غیرکارا جلوگیری می‌کند.

این نکته که روش ε-Constraint تقویت‌شده، تنها جواب‌های کارا تولید می‌کند، از نظر ریاضی قابل‌اثبات است. برای اثبات آن به [۸] مراجعه کنید.

همان طورکه اشاره شد، مدل مسئلهٔ این پژوهش حالت خاصی از مسئلهٔ مشارکت واحدها[10] است. از زمانی‌که نخستین‌بار مسئلهٔ مشارکت واحدها رسماً منتشر شد [۱۳]، رویکردهای زیادی از جمله در [۱۴] برای فرموله‌کردن آن ارائه شدند. هدف اصلی مسئلهٔ مشارکت واحدها- آن‌طور که در [۱۵] آمده- ارائهٔ طرحی با کمترین هزینه برای روشن و خاموش‌کردن مجموعه‌ای از ژنراتورهای تولیدکنندهٔ انرژی الکتریکی است؛ به‌گونه‌ای‌که تقاضای توان الکتریکی را پوشش دهد و مجموعه‌ای از محدودیت‌های بهره‌برداری را ارضا کند. هزینه‌های تولید شامل سوخت، راه‌اندازی و توقف و هزینه‌های بی‌باری هستند. محدودیت‌ها نیز شامل ظرفیت ذخیره، حداقل زمان راه‌اندازی یا توقف، حداکثر توان قابل‌جریان در خطوط انتقال و محدوده‌های بهره‌برداری است.

برای حل این مسئله، روش های مرسوم و معروف به‌کار گرفته شده‌اند؛ از جمله برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی دینامیک، روش تجزیهٔ Bender، روش Bound and Branch و روش Relaxation Lagrangian. به‌تازگی نیز برای حل مسئلهٔ مشارکت واحدها، از روش های فراابتکاری استفاده شده است: روش Annealing Simulated، جست‌وجوی ممنوع[11] و الگوریتم ژنتیک. در بعضی مطالعه‌های موردی مانند [۱۶] نیز از روش‌های ابتکاری خاص مسئله استفاده شده است. همچنین لی و همکاران با رویکرد مدیریت منابع (انرژی، سوخت و آلاینده ها) [۱۷] مسئلهٔ مشارکت واحدها را مدل‌سازی کردند.

مدل‌سازی نیروگاه با توجه به پارامترهای بسیار زیاد فیزیکی و پیچیدگی روابط میان آن ها کار بسیار دشوار و پراهمیتی است. در مرجع [۱۸] یک مدل نیروگاه سیکل ترکیبی برای استفاده در مسائل بهینه‌سازی طراحی شد و نشان داده شد که این مدل دارای دقت کافی است. همچنین زولاکیس و همکاران [۱۹] برای افزایش بازدهی نیروگاه بخار از طریق نرم‌افزار شبیه‌سازی و بهینه‌سازی gPROMS، از مدلی ریاضی استفاده کردند که در این مطالعهٔ موردی سبب افزایش مطلق بازدهی به‌میزان ۰/۵۵ درصد و کاهش مصرف سوخت به میزان ۲/۰۵ درصد شد. در پژوهش [۲۰] روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[12] و الگوریتم ژنتیک برای شبیه سازی و بهینه سازی یک نیروگاه زمین گرمایی مقایسه شد و نشان داده شد که روش PSO مقادیری بهتر (و بیشتر) برای تابع هدف ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که الگوریتم ژنتیک، سرعت بهتری دارد.

کیفیت بخار خروجی از انتهای توربین بخار به‌عنوان یک عامل محدودکننده نیز از سوی گنجه کویری و

www.SID.ir

Archive of SID

همکاران [۲۱] در یک مسئله افزایش توان خروجی نیروگاه سیکل ترکیبی درنظر گرفته شد.

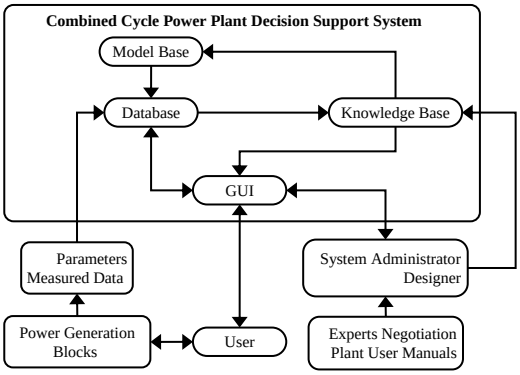
همچنین حاج‌عبداللهی و همکاران [۲۲] با استفاده از روش‌های NSGA-II و ANN، بهینه‌سازی چندهدفهٔ یک نیروگاه بخار را انجام دادند. درنهایت، ۳/۷۶ درصد افزایش بازدهی و ۳/۸۴ درصد کاهش هزینه گزارش شد.

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی مسئلهٔ مشارکت واحدها، از روش برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شد و برای تعیین ضرایب متغیرهای تصمیم در توابع هدف، استفاده از یک سیستم خبره پیشنهاد شد. به‌دلیل استفاده از سیستم خبره، مدل استاندارد مسئلهٔ UCP بسیار ساده‌تر و درنهایت، سبب کاهش چشمگیر حجم محاسبات شد.

تعریف مسئله و روش حل پیشنهادی

هدف اصلی از طرح مسئلهٔ پژوهش، افزایش سهم تولید واحدهای با بازدهی بالاتر و کاهش سهم تولید واحدهای با ریسک بیشتر در تولید کل مورد درخواست از نیروگاه است و پس از حل مدل، بهترین ترکیب ممکن برای توزیع بار بین واحدهای در مدار نیروگاه به‌دست می‌آید. متغیرهای زبانی و اعداد فازی مربوط و محدوده‌های آن‌ها براساس تجربه‌های افراد خبرهٔ سیستم استخراج و انتخاب شدند. همچنین تمامی شرایط و قواعد سیستم خبره، پس از مطالعهٔ تجربه‌های این افراد و مصاحبه با آن ها مستند شد. به‌این ترتیب، پایگاه دانش سیستم خبره ساخته شد و از نتیجه و برایند این قوانین، درنهایت مدل ریاضی تشکیل شد. با توجه به اطلاعات ورودی، به‌ازای هر واحد تولیدی نیروگاه، در پایگاه دانش، خروجی متناظر- که به صورت فازی است- ایجاد و پس از دفازی‌شدن، به پایگاه مدل اعمال می شود. سپس در پایگاه مدل، با استفاده از مدل برنامه ریزی ریاضی حل می‌شود و بهترین جواب ممکن به دست می آید. این جواب (مقدار تولید تخصیص‌یافته به هر واحد)، از طریق پایگاه داده و رابط کاربر، به وی ارائه می‌شود. با اعمال این مقدار تخصیص‌یافته، شرایط واحدها نسبت به حالت قبلی تغییر می کند. درنتیجه، این چرخه بار دیگر با شرایط جدید، اجرا و جواب جدیدی ایجاد می شود. تکرار این چرخه تا زمانی انجام می‌شود که محدودیت‌های فنی واحدها، مانع تغییرهای خاصی در جواب مسئله شوند.

در شکل ۳ سیستم پشتیبان تصمیم پیشنهادی برای مسئلهٔ خاص افزایش بازدهی و کاهش ریسک نیروگاه سیکل ترکیبی مشاهده می‌شود.



شکل ۳. سیستم پشتیبان تصمیم نیروگاه سیکل ترکیبی

تشکیل پایگاه دانش (بخش خبره و هوشمند سیستم) در سیستم پیشنهادی، از سوی مدیر یا طراح سیستم و با استناد به مصاحبه با افراد خبره و باسابقه و نیز راهنمایی‌ها و دستورالعمل‌های سازنده انجام می‌شود. به‌این‌ترتیب که به‌ازای شرایط خاص واحدها- که با جمله‌های شرطی «اگر- آن‌گاه» و با پارامترهای فازی بیان می‌شود- برای هر بلوک تولیدی، اولویتی برای بازدهی و همچنین ریسک تعیین می‌شود.

کاربر شرایط واقعی و فعلی واحدها را به‌عنوان ورودی وارد می‌کند. بخشی نیز از طریق حسگرهای نصب‌شده در فرایند اندازه‌گیری می‌شوند، از طریق سیستم مونیتورینگ واحدها استخراج و به پایگاه داده وارد می‌شوند. این ورودی‌ها در پایگاه دانش، بررسی و تحلیل می‌شوند. سپس با توجه به هریک از شرایطی که برقرار باشد، اولویت بازدهی و ریسک برای هر بلوک مشخص می‌شود که پارامتری فازی است. درنهایت، پس از دفازی‌شدن، به‌عنوان ورودی به پایگاه مدل- که شامل مدل برنامه‌ریزی ریاضی است- اعمال می‌شود.

در پایگاه مدل، با توجه به مقدار تولیدی درخواستی از نیروگاه، مسئلهٔ ماکزیمم‌کردن مقیاس بازدهی و مینیمم‌کردن مقیاس ریسک، حل می‌شود. پاسخ به‌صورت تخصیص بخشی از کل تولیدی مورد نیاز به هر بلوک، از طریق پایگاه داده و رابط کاربری، به کاربر ارائه می‌شود.

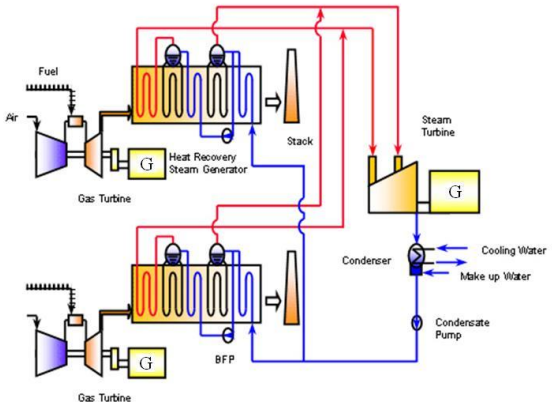
با اعمال این پاسخ (تنظیمات جدید) به فرایند و

www.SID.ir

Archive of SID

گذشت زمان اندک، پارامترها و شرایط تغییر می‌کند، دوباره در سیستم خبره، بررسی و پس از حل، پاسخ جدیدی ایجاد می‌شود. این چرخه- همان‌طورکه گفته شد- ممکن است تا برقراری محدودیت‌های فنی یا رسیدن به مقدار تولیدی مورد درخواست تکرار شود.

این پژوهش در نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان انجام شد و در آن، در خروجی هر توربین گاز، یک بویلر بازیاب نصب شد. هردو بویلر بازیاب، یک توربین بخار را تغذیه می‌کنند. هردو توربین گازی به‌همراه بویلرها و توربین بخار مربوط، یک بلوک را تشکیل می‌دهند. درمجموع، سه بلوک تولیدی (شش توربین گازی و بویلرهای بازیاب مربوط به‌همراه سه توربین بخار) به‌همراه سایر تجهیزات جانبی و کمکی در این نیروگاه نصب شدند و درحال بهره‌برداری‌اند (شکل ۴).



شکل ۴. تولید انرژی در نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان

توربین‌های گازی، با استفاده از هوا و سوخت، انرژی الکتریکی را به‌عنوان ورودی، در ژنراتور و حرارت را به‌عنوان خروجی در دودکش ارائه می‌کنند. انرژی گرمایی تلف شده در بویلرهای بازیاب، بازیافت و سبب تبدیل آب به بخار می شود. بخارهای تولیدشده از دو بویلر با یکدیگر مخلوط می‌شوند و در توربین بخار برای تولید انرژی الکتریکی به‌کار می‌روند. درنهایت، بخار مجدداً به آب، تبدیل و در سیکل تولید انرژی برق استفاده می‌شود. درنتیجه، می‌توان گفت که سوخت به‌عنوان تنها ورودی مجموعه و کل تولید شش واحد گاز و سه واحد بخار، خروجی این چرخه‌اند.

توان اسمی هر واحد گازی، ۱۳۰ مگاوات و هر واحد بخار ۱۳۰ مگاوات است و درمجموع در هر بلوک، ۳۹۰ مگاوات و در کل نیروگاه، ۱۱۷۰ مگاوات قابل‌تولید است. البته در شرایط محیطی بسیار مناسب، این توان برای واحدها تا ۱۵۰ مگاوات و درمجموع، ۱۳۵۰ مگاوات قابل‌افزایش است. این شرایط، در فصول مختلف سال و با توجه به شرایط واحدها متغیر است.

درنتیجهٔ مصاحبه با کارکنان خبره و مطالعهٔ دستورالعمل‌ها، پارامترهای مؤثر و ورودی‌های سیستم خبره به این صورت به‌دست آمدند: مقدار تولیدی فعلی هر واحد، مقدار بازدهی لحظه‌ای (محاسبه‌شده با استفاده از دبی سوخت و تولیدی فعلی)، دمای خروجی توربین‌های گازی، دمای اسلات‌های ژنراتورها، دمای روغن روان‌کاری، دمای روغن روان‌کاری ورودی به یاتاقان‌ها، میزان فشار کندانسور هوایی، تعداد پمپ‌های سیرکولاسیون، فیدواتر و کندانس دردسترس و آماده، میزان لرزش یاتاقان‌های توربین‌ها.

بعضی از عوامل فوق، بر بازدهی و بعضی نیز بر ریسک تأثیرگذارند. همچنین بعضی از این متغیرها را می‌توان فازی کرد و بعضی نیز غیرفازی هستند، اما می‌توان از آن‌ها برای استنتاج و ایجاد خروجی فازی استفاده کرد. منظور از ریسک، احتمال خروج اضطراری واحد (در کوتاه‌مدت) یا افزایش آسیب به واحد (در درازمدت) است.

در این مطالعه، برای ورودی‌ها و خروجی‌های فازی، تشکیل پایگاه قواعد و درنهایت، ایجاد خروجی سیستم خبره و دفازی‌کردن آن‌ها، از نرم‌افزار *fuzzy*TECH شرکت Inform استفاده شده است (fuzzytech.com).

پس از این مرحله، برای هر پارامتر ورودی غیرفازی، محدودهٔ تغییرها مشخص و سپس برای هر سطح از پارامتر، یک مقدار زبانی اختصاص داده می‌شود و به‌این‌ترتیب، درجهٔ عضویت متغیرهای ورودی تعیین می‌شود. این مرحله، فقط برای متغیرهای ورودی که نیاز به فازی‌شدن دارند، انجام می‌شود. این کار نیز به‌کمک مصاحبه با افراد خبره انجام می‌شود. در این مرحله به هر متغیر فازی، عبارت‌های زبانی very high، high، medium، low، very low اختصاص داده می‌شود. در نرم‌افزار مورد استفاده، می‌توان به‌راحتی این سطوح را تعریف کرد. نتیجهٔ این عمل برای دو متغیر ورودی تولیدی واحد و دمای خروجی توربین گازی، در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

پس از مشخص‌کردن ورودی‌ها، مرحلهٔ بعد، تعریف و تعیین محدوده‌های فازی برای متغیرهای خروجی است. در شکل ۶ متغیرهای خروجی بازدهی و ریسک و سطوح فازی

www.SID.ir

Archive of SID

آن‌ها مشاهده می‌شود. سایر متغیرها را کاربر درهنگام تشکیل مدل از طریق رابط کاربری تشکیل مدل ریاضی (که در نرم‌افزار اکسل طراحی شده) وارد می‌کند. سپس برای تشکیل سیستم خبره، باید ارتباط این پارامترها با یکدیگر و با خروجی‌ها، با استفاده از بلوک‌های قواعد[۱۳] مشخص شود (شکل ۷). همچنین یک نمونه از قواعد مربوط به ریسک نوع سوخت واحد گازی، در جدول ۱ آمده است. تجمیع قواعد و ایجاد خروجی دفازی نهایی، به‌روش ممدانی (مرکز سطح) انجام شده است. در پنجرهٔ Interactive Debug Mode نیز با تغییر در وضعیت ورودی‌ها می‌توان بلافاصله تغییر خروجی‌ها را مشاهده کرد.

در نیروگاه مورد مطالعه، تغییرهای تولیدی کل سیستم، عموماً با تغییر تولیدی واحدهای گازی انجام می‌شود و تولیدی واحدهای بخار، تابعی از تولیدی واحدهای گازی مربوط است؛ بنابراین، معادلهٔ برنامه‌ریزی در این مورد خاص، با توجه به مدل ارائه شده در قسمت مرور ادبیات، به‌ازای $n=6$ به‌صورت زیر است:

$$Max\ B = G_1E_1 + G_2E_2 + \cdots + G_6E_6$$

$$Min\ C = G_1R_1 + G_2R_2 + \cdots + G_6R_6 \quad (۱۳)$$

$$\text{S.t} \quad (۱۴)$$

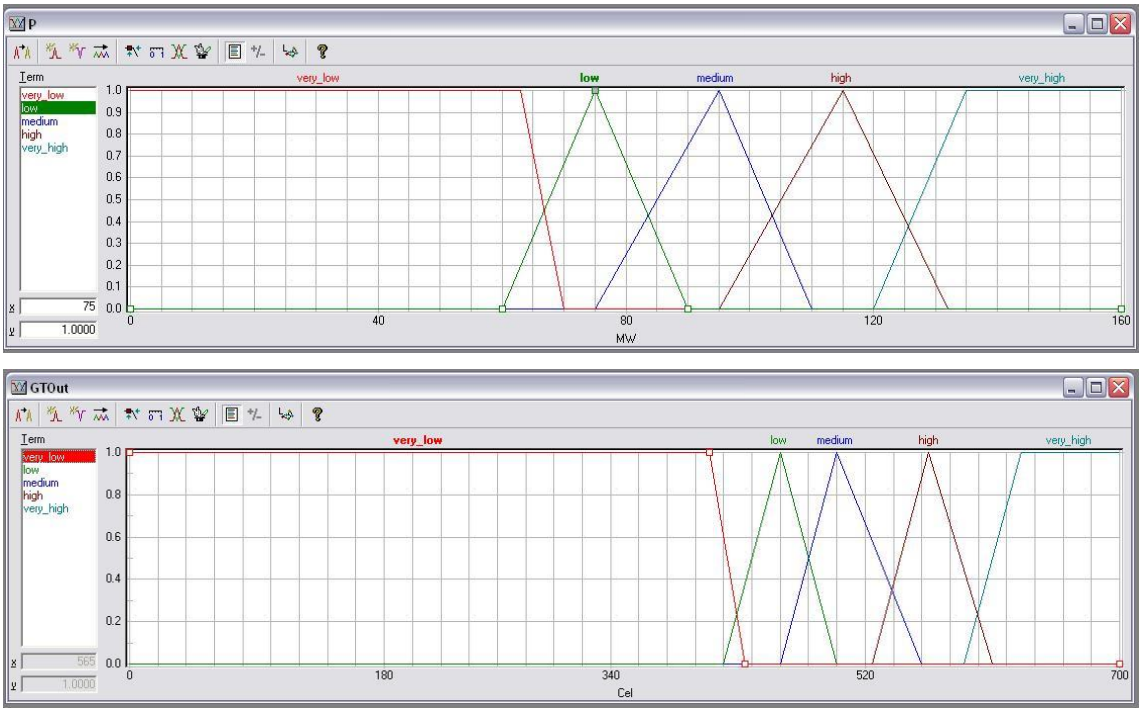
$$\forall i: Min_i \leq G_i \leq Max_i \quad (۱۵)$$

$$\forall j: Min_j \leq S_j \leq Max_j \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i=1}^{n} G_i + \sum_{j=1}^{m} S_j \geq D \quad (۱۷)$$

جدول ۱. نمونهٔ قواعد سیستم خبره

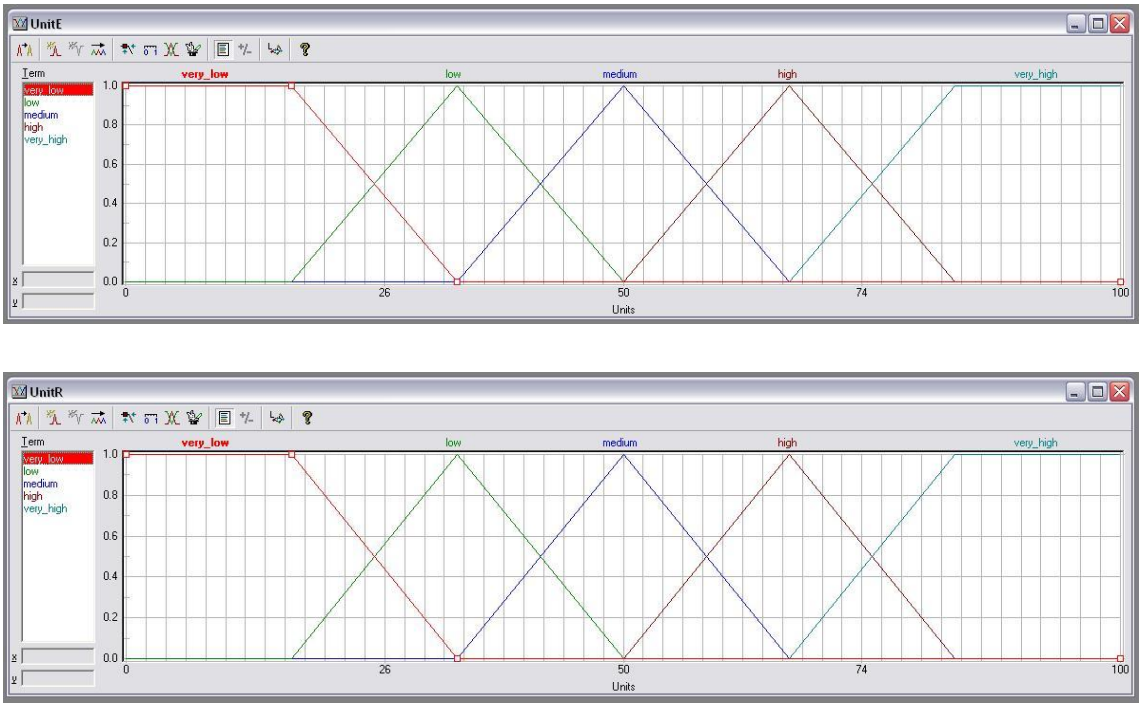
IF	AND	THEN
Type Fuel	MW GT	Risk1 GT
GasDiff	low very	low very
GasDiff	low	low very
GasDiff	medium	Low
GasDiff	high	Medium
GasDiff	high very	high
GasPrmx	low very	low
GasPrmx	low	medium
GasPrmx	medium	high
GasPrmx	high	high very
GasPrmx	high very	high very
Oil	low very	low
Oil	low	medium
Oil	medium	high
Oil	high	high very
Oil	high very	high very
Mix	low very	low
Mix	Low	low
Mix	medium	medium
Mix	high	high
Mix	high very	high very



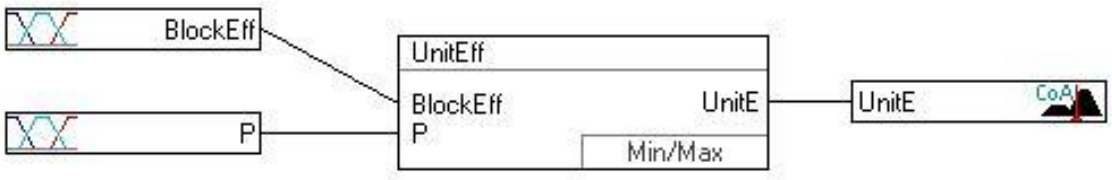
شکل ۵. تعریف متغیرهای ورودی فازی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. تعریف متغیرهای خروجی فازی



شکل ۷. ترکیب متغیرهای ورودی فازی و ایجاد خروجی

در روابط ۱۳ تا ۱۷ داریم:

B: تابع هدف بازدهی که از نوع سود و به‌مفهوم بیشینه‌کردن بازدهی است

C: تابع هدف ریسک که از نوع هزینه و به‌مفهوم کمینه‌کردن ریسک است

E_i: مقیاس بازدهی هر واحد گازی (ضریب ثابت هنگام حل مدل)

R_i: مقیاس ریسک هر واحد گازی (ضریب ثابت هنگام حل مدل)

G_i: مقدار ست پوینت هر واحد گازی که پس از حل مدل، به‌عنوان خروجی به کاربر ارائه می‌شود (متغیر)

S_j: مقدار تولید هر واحد بخار

D: کل تولید مورد درخواست از نیروگاه که از طرف مرکز کنترل اعلام می‌شود (پارامتر ورودی)

Min_i، Max_i، Min_j و Max_j: حداقل و حداکثر توان قابل‌تولید هر واحد گاز و بخار (اندیس i برای واحد گاز و اندیس j برای واحد بخار) که با توجه به شرایط محیط و شرایط فنی واحدها، قابل‌تعیین است و از سوی کاربر مشخص می‌شود. اگر واحدی در دسترس نباشد، این مقادیر در سیستم خبره از سوی کاربر برای آن واحد، برابر با صفر درنظر گرفته می‌شود.

در محدودیت اول بیان شده است که مقدار تولیدی تخصیص‌یافته به هر واحد باید بزرگ تر از حداقل توان مجاز و نباید بیشتر از حداکثر توان قابل‌تولید واحد باشد (عملاً امکان‌پذیر نیست). همچنین مطابق محدودیت دوم، توان تولیدی واحدهای گازی نباید به حدی پایین تنظیم شود که توان تولیدی واحد بخار از مقدار معینی کمتر شود؛ زیرا در حالت عادی با این کار، دمای بخار ورودی به توربین بخار، افت می‌کند و سبب ایجاد اشکال‌هایی در توربین بخار می‌شود. همچنین تولید واحد بخار نیز نباید از حد معینی

www.SID.ir

Archive of SID

بالاتر باشد. همان‌طورکه در پاراگراف قبل توضیح داده شد، با صفرکردن این مقادیر برای هر واحد می‌توان خارج‌بودن واحد از مدار را مدل کرد. محدودیت سوم نیز به این معناست که مجموع تولیدی‌های تخصیص‌یافته به واحدهای گازی و واحدهای بخار مربوط، باید جوابگوی کل تولید درخواستی باشد.

برای حل مدل، ابتدا برای استانداردکردن مدل، تابع هدف دوم (معادلهٔ ۱۴) را نیز به فرم ماکزیمم تبدیل می‌کنیم:

$$Max\ -C = -G_1R_1 - G_2R_2 - .. - G_6R_6 \qquad (۱۸)$$

سپس مطابق روش ε-Constraint تقویت‌شدهٔ پیشنهادی، مدل را به‌شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

(۱۹)

$$Max\ B = G_1E_1 + G_2E_2 + \ldots + G_6E_6 + eps.(s_2 / r_2)$$

S.t

$$\forall i : Min_i \le G_i \le Max_i \qquad (۲۰)$$

$$\forall j : Min_j \le S_j \le Max_j \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{i=1}^{n} G_i + \sum_{j=1}^{m} S_j \ge D \qquad (۲۲)$$

$$-G_1R_1 - G_2R_2 - .. - G_6R_6 - s_2 = e_2 \qquad (۲۳)$$

سپس براساس فرایند حل مسئله، جدول Payoff را برای تابع هدف دوم- که به فرم ماکزیمم تبدیل کرده‌ایم- تشکیل می‌دهیم. برای راحتی کاربر درهنگام حل مسئله، حد پایین را برابر با پایین‌ترین مقدار تابع هدف دوم در جدول Payoff درنظر می‌گیریم. دامنه را نیز برابر با اختلاف بالاترین و پایین‌ترین مقدار تابع هدف دوم در جدول Payoff درنظر می‌گیریم.

سپس کاربر این مقادیر و مقدار g را- که تعداد نقاط شبکه است- انتخاب می‌کند. این پارامتر در واقع همان‌طور که توضیح داده شد- تراکم مجموعهٔ جواب‌هاست و هرچه بیشتر باشد، تعداد جواب‌های ارائه‌شده بین حد بالا و پایین بیشتر می‌شود؛ بنابراین، باید این مقدار به‌طور مناسبی از سوی کاربر انتخاب شود.

برای پارامترeps (اپسیلون) نیز در فرایند حل، مقدار ۰/۰۰۱ انتخاب شده است.

آزمایش عددی

برای نمونه و مشاهدهٔ نتایج سیستم، در چند حالت برنامه اجرا شده و جواب‌ها به‌صورت جدول‌های ۲ و ۳ به‌دست آمده‌اند.

مطابق جدول‌های زیر، در نمونهٔ اول، دو واحد ۵ و ۶ با توجه به اندکی ریسک بیشتر و بازدهی بالا در مقایسه با واحدهای ۱ تا ۴، افزایش بیشتری داده شده‌اند. در نمونهٔ دوم- که برای کاهش تولیدی واحدها حل شده است- باز هم دو واحد ۵ و ۶ به‌دلیل بازدهی بالاتر و ریسک تقریباً برابر در مقایسه با واحدهای دیگر، کاهش تولیدی داده نشده‌اند و درعوض، واحدهای ۱ تا ۴ این کاهش تولیدی را متحمل شده‌اند. این امر سبب می‌شود که همواره تخصیص تولیدی مورد نیاز بین واحدها به‌نحو مناسب انجام شود.

از لحاظ شهودی، این نتایج منطقی به‌نظر می‌رسند، اما از نظر تجربی، به‌دلیل نبود امکانات بررسی شرایط واحدها به‌طور لحظه‌ای و کمبود زمان، جز در موارد کاملاً مشخص، معمولاً کاربران ترجیح می‌دهند همهٔ واحدها به‌طور یکسان تولیدی مورد نیاز را تأمین کنند که این عمل از نظر بازدهی و ریسک صحیح نیست و هدف از این پژوهش نیز نشان‌دادن این واقعیت است.

برای نمونه، فقط با محاسبهٔ بازدهی برای حالت اول، درهنگام آغاز، بازدهی کل نیروگاه حدود ۳۸ درصد است. اگر کل واحدها را به‌طور یکسان افزایش دهیم تا درمجموع به کل تولیدی مورد درخواست برسیم، بازدهی کل حدود ۴۸/۷ درصد می‌شود؛ درحالی‌که با استفاده از سیستم پیشنهادی و بهبود روش تخصیص تولیدی به واحدها مطابق جدول فوق، بازدهی در حدود ۴۹/۱ درصد خواهد شد.

با یک محاسبهٔ ساده می‌توان دریافت که این مقدار به‌معنای کاهش حدود ۰/۸ درصد در مصرف سوخت است که در شرایط مربوط به مثال اول، صرفه‌جویی معادل حدود ۲۴ هزار مترمکعب گاز طبیعی در یک ساعت خواهد بود. به‌طور متوسط، اگر این شرایط دو ساعت در شبانه‌روز و حدود ۳۵۰ روز در سال اتفاق بیفتد، صرفه‌جویی سالانه‌ای معادل بیش از ۱۶ میلیون مترمکعب گاز طبیعی خواهیم داشت که با دانستن قیمت گاز طبیعی، صرفه‌جویی مستقیم در هزینهٔ سوخت مشخص خواهد شد و فواید جانبی دیگری از جمله کاهش آلودگی محیط زیست و کاهش استهلاک نیروگاه و کاهش هزینه‌های تعمیرات نیز به‌دست خواهد آمد.

درصورت محاسبهٔ ریسک واحدها نیز به نتیجهٔ مشابهی

www.SID.ir

Archive of SID

می‌رسیم و می‌بینیم که تخصیص یکسان تولیدی بین واحدها، علاوه بر نرسیدن به بازدهی مناسب، سبب افزایش ریسک در بهره‌برداری از واحدها می‌شود.

جدول ۲. نمونهٔ حل‌شده برای افزایش تولیدی

Test1: Act.=735, Demand=950

Input	G1	G2	G3	G4	G5	G6	S1	S2	S3
MW	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۵	۸۵	۸۵
R	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۶۰	۶۰	-	-	-
E	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۸۰	۸۰	-	-	-
Max	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	-	-	-
Min	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۵	۸۵	۸۵

Output	G1	G2	G3	G4	G5	G6	S1	S2	S3
Setpoint	۸۲	۸۲	۱۰۵	۱۰۵	۱۲۵	۱۲۵	۹۰	۱۱۰	۱۲۵

جدول ۳. نمونهٔ حل‌شده برای کاهش تولیدی

Test 2: Act.=1153, Demand=950

Input	G1	G2	G3	G4	G5	G6	S1	S2	S3
MW	۱۲۸	۱۲۸	۱۲۶	۱۲۶	۱۳۰	۱۲۸	۱۳۱	۱۲۹	۱۲۷
R	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۶۰	۶۰	-	-	-
E	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۸۰	۸۰	-	-	-
Max	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	-	-	-
Min	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۵	۸۵	۸۵

Output	G1	G2	G3	G4	G5	G6	S1	S2	S3
Setpoint	۹۴	۹۴	۹۴	۹۴	۱۲۲	۱۲۲	۱۰۲	۱۰۲	۱۲۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل برنامه ریزی ریاضی دوهدفه برای ماکزیمم‌کردن بازدهی و مینیمم‌کردن ریسک در فرایند تولید انرژی الکتریکی در یک نیروگاه سیکل ترکیبی (از طریق یافتن بهترین ترکیب از توزیع بار میان واحدهای در مدار نیروگاه) در مطالعه‌ای موردی در نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان ارائه شد. در تشکیل مدل ریاضی، از یک سیستم خبرهٔ فازی برای تعیین ضرایب متغیرهای مدل در توابع هدف استفاده شده است که این ضرایب درواقع، مقیاسی برای بازدهی و ریسک هر واحد به‌شمار می‌روند.

پس از حل مدل، وظیفهٔ تولید توان الکتریکی مورد نیاز، به واحدهای با ضریب بازدهی بالاتر و ضریب ریسک پایین تر با توجه به کل توان مورد نیاز شبکه اختصاص می‌یابد. بدین‌ترتیب، هدف اصلی این پژوهش- که ایجاد یک سیستم خبره و تلفیق آن با رویکرد برنامه‌ریزی برای تولید انرژی الکتریکی با بهترین بازدهی ممکن و ریسک پایین است- ارضا شده است. مقدار بهبود بازدهی و ریسک نیز براساس مطالعهٔ موردی انجام‌شده، شایان توجه است. این تغییرها از یک سو با صرفه جویی در هزینهٔ سوخت و کاهش خروج‌های اضطراری و هزینه های تعمیر از سوی دیگر، سبب بازگشت هزینه های شایان توجهی به مجموعه خواهند شد.

یکی از تغییرهایی که در تکمیل فرایند این پژوهش می‌توان پیشنهاد کرد، تشکیل مدل به‌صورت فازی است. به‌این‌ترتیب که پس از تعیین خروجی های سیستم خبره، عمل دفازی‌کردن انجام نشود و مدل ریاضی به‌طور مستقیم به‌صورت فازی تشکیل شود. سپس با کمک روش‌های موجود در برنامه‌ریزی ریاضی فازی، مسئله حل شود.

پیشنهاد دیگر طراحی سیستم خبره و استنتاج و تعیین ضرایب با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی است. در این روش نیز می‌توان با استفاده از نظر افراد خبره، ماتریس مقایسه‌های زوجی را تشکیل داد و درنهایت، ضرایب مدل را به‌صورت فازی یا غیرفازی (دفازی‌شده) تعیین کرد.

پیشنهاد بعدی برای پژوهش‌های آینده، حل مدل با استفاده از روش ε-Constraint تقویت‌شدهٔ وزین است. اغلب، هریک از توابع هدف در یک مسئلهٔ بهینه سازی چندهدفه، درجهٔ اهمیت مخصوص به خود را دارند؛ بنابراین، با درنظرگرفتن اوزان مشخص برای دو تابع هدف مسئله (بازدهی و ریسک) می‌توان مدل را تکمیل‌تر ساخت. جزئیات روش ε-Constraint تقویت‌شدهٔ وزنی در مرجع [۱۱] آمده است.

همچنین برای توسعهٔ سیستم طراحی‌شده می‌توان علاوه‌بر بازدهی و ریسک، عوامل دیگری را که در فرایند تولید انرژی الکتریکی تأثیرگذارند و نیز مانورها و عملیاتی را که هنگام بهره‌برداری انجام می‌شود و نیاز به تجربه و تصمیم بهره بردار دارند، تحلیل کرد و به سیستم پیشنهادی افزود.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

1. Ghazanfary, M .(2011)“ .Expert Systems Fundamentals ”.3rd Edition.
2. Negnevitsky, M .(2011)“ .Artificial Intelligence :A Guide to Intelligent Systems ”.3rd Edition.
3. Little ,J.D.C .(1970)“ .Models and Managers :The Concept of a Decision Calculus ”.*Management Science* , Vol .16 ,No .8.
4. Bonczek ,R.H., Holsapple ,C.W. and Whinston ,A.B .(1980)“ .The Evolving Roles of Models in Decision Support Systems ”.*Decision Sciences* ,Vol .11 ,No .2.
5. Turban, Efraim“ ,Decision Support Systems And Intelligent Systems ”.7th Ed.
6. Pargar ,F .(2011)“ .Developing Decision Support Systems in Excel ”.1st Ed.
7. Matthias Ehrgott ,(2005)“ .Multicriteria Optimization ”.Springer ,2nd Ed.
8. George Mavrotas ,(2009)“ .Effective implementation of the ε-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems ”.*Applied Mathematics and Computation,* 213.
9. Chankong ,V .and Haimes ,Y.Y .(1983)“ .Multiobjective Decision Making :Theory and Methodology ”. North-Holland, New York.
10. Cohon ,J.L .(1978)“ .Multiobjective Programming and Planning ”.Academic Press, New York.
11. Esmaili ,M ,.Amjady ,N .and Shayanfar ,H. A .(2011)“ .Multi-objective congestion management by modified augmented ε- constraint method ”.*Applied Energy* ,88.
12. Wood ,AJ .and Wollenberg ,BF .(1996)“ .Power generation ,operation and control ”.2nd ed .Wiley ,New York.
13. Lowery ,P. G .(1966)“ .Generating unit commitment by dynamic programming ”.*IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* ,PAS-85(5):422-426.
14. Barry Rountree ,(2011)“ .A Linear Programming Formulation of the Unit Commitment Problem”.
15. Sheble, G. B. and Fahd ,G. N .(1994)“ .Unit Commitment Literature Synopsis ”.*IEEE Trans .on Power Systems* ,Vol .9 ,No .1 ,PP .128-135.
16. Alice E. Smith, Jorge Valenzuela ,(2000)“ .A Seeded Memetic Algorithm for Large Unit Commitment Problems ”.*Journal of Heuristics*.
17. Lei Wu, Mohammad Shahidehpour and Tao Li ,(2007)“ .Stochastic Security-Constrained Unit Commitment”.
18. Adrian Tică ,Hervé Guéguen ,Didier Dumur ,Damien Faille ,Frans Davelaar ,(2012)“ .Design of a combined cycle power plant model for optimization ”.*Applied Energy* ,Vol .98.
19. Tzolakis ,G ,.Papanikolaou ,P ,.Kolokotronis ,D ,.Samaras ,N ,.Tourlidakis ,A. and Tomboulides ,A . (2012)“ . Simulation of a coal-fired power plant using mathematical programming algorithms in order to optimize its efficiency ”.*Applied Thermal Engineering* ,Vol .48.
20. Joshua Clarke, Laura McLay, James T. McLeskey Jr ,.(2014)“ .Comparison of genetic algorithm to particle swarm for constrained simulation-based optimization of a geothermal power plant ”.*Advanced Engineering Informatics* ,Vol .28 ,Issue 1.
21. Ganjehkaviri ,A ,.Mohd Jaafar ,M.N. and Hosseini ,S.E .(2015)“ .Optimization and the effect of steam turbine outlet quality on the output power of a combined cycle power plant ”.*Energy Conversion and Management* ,Vol .89.

www.SID.ir

Archive of SID

22. Hajabdollahi ,F ,.Hajabdollahi ,Z. and Hajabdollahi ,H .(2012)“ .Soft computing based multi-objective optimization of steam cycle power plant using NSGA-II and ANN ”.*Applied Soft Computing* ,Vol .12 ,Issue 11.

واژه‌های انگلیسی به‌ترتیب استفاده در متن

1. Vibration Problem
2. Trip
3. Process Failure Risk
4. Rule-Based Programming
5. Feigenbaum
6. Knowledge Base
7. Inference Engine
8.. DSS: Decision Support System
9. Unit Commitment
10. UCP
11. Taboo Search
12. Particle Swarm Optimization (PSO)
13. Rule Blocks

www.SID.ir