Archive of SID

مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۹-۶۵

Original Article

بهینه‌سازی برنامه‌ی زمانی روزانه‌ی نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی سیاه‌بیشه با استفاده از مدل‌سازی مسئله در قالب الگوریتم ژنتیک

محمدهادی افشار (دانشیار)
مسعود کاووسی * (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

استفاده از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی به‌عنوان یکی از راه‌های تعدیل میزان اختلاف در عرضه و تقاضای انرژی برق، بسیار مؤثر است. ظرفیت بالای ذخیره‌ی انرژی، واکنش سریع در برابر نوسانات شبکه‌ی برق، ذخیره‌ی طولانی‌مدت انرژی و... از مزایای این سیستم است. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی برنامه‌ی بهره‌برداری روزانه‌ی یک نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی است. برای دستیابی به این برنامه‌ی بهینه، کمینه‌سازی میزان اختلاف در عرضه و تقاضای انرژی برق شبکه مورد بررسی قرارگرفته است. برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک با کدنویسی دودویی استفاده شده است. نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی سیاه‌بیشه به‌عنوان مطالعه‌ی موردی این مسئله در نظرگرفته شده و درنهایت، پاسخ‌های این مسئله به‌صورت برنامه‌ی بهره‌برداری از نیروگاه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز به‌دست آمده است.

واژگان کلیدی: نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی، تعادل شبکه‌ی برق، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، نیروگاه سیاه‌بیشه.

mhafshar@iust.ac.ir
masoudkavoosi@yahoo.com

۱. مقدمه

اختلاف در میزان عرضه و تقاضای انرژی برق، مشکلات و هزینه‌های زیادی را برای تجهیزات شبکه‌ی برق، تولیدکننده‌ی برق، و مصرف‌کننده‌ی آن به‌وجود می‌آورد. افت ناگهانی ولتاژ، افزایش هزینه‌های ناشی از استهلاک برق در شبکه، آسیب به وسایل برقی مصرف‌کنندگان و... از جمله مشکلاتی است که ناشی از اختلاف در عرضه و تقاضای برق است. برای حل این مشکل استفاده از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی متداول شده است. نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی، برق مازاد در زمان کمی مصرف را با پمپاژ آب به مخزن بالادست ذخیره می‌کنند و در زمان اوج مصرف با انتقال آب به مخزن پایین‌دست و راه‌اندازی توربین‌ها، آن را به شبکه تزریق می‌کنند.

مسئله‌ی اصلی، نحوه‌ی بهره‌برداری از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی است. بدین معنا که چه زمانی و با چه مقدار دبی، عملیات پمپاژ و چه زمانی و با چه مقدار دبی، عملیات تولید برق صورت پذیرد. این مسئله، محور اصلی این نوشتار را تشکیل می‌دهد. در واقع هدف اصلی این مسئله این است که زمان و میزان دبی پمپاژ و دبی آب عبوری از توربین‌ها را در یک دوره‌ی ۲۴ ساعته‌ی شبانه‌روز تعیین کند. برای دست‌یابی به این هدف، کمینه‌سازی میزان اختلاف در عرضه و تقاضای انرژی مد نظر قرار داده شده است.

پژوهش‌های مختلفی در زمینه‌ی نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی انجام شده است، که شمار قابل توجهی از آن‌ها بر روی اندرکنش نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی و نیروگاه‌های بادی تمرکز داشته‌اند. در پژوهشی در سال ۱۹۹۲، الگوریتمی برای محاسبه‌ی برنامه‌ی تولیدی نیروگاه آبی حرارتی در اندرکنش با یک سیستم تلمبه‌ی ذخیره‌یی توسعه داده شده است، که در آن با استفاده از روش تعدیل لاگرانژی سیستم به دو زیرمسئله‌ی آبی و حرارتی تجزیه شده است.[۱] همچنین در سال ۱۹۹۷، روشی مؤثر برای برنامه‌ریزی و ارزیابی سیستم تلمبه‌ی ذخیره‌یی ارائه و نیز یک شبیه‌سازی کاربردی دقیق با استفاده از مدل هزینه‌ی تولید محتمل ساعتی معرفی و توسط آن وابستگی زمانی روند عملیات ذخیره‌سازی انرژی از طریق فرایندهای ذخیره و آزادسازی انرژی انعکاس داده شده است.[۲] برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۰۶، نیروگاه‌های بادیِ[۱] مرکب با سیستم تلمبه‌ی ذخیره‌یی را جهت افزایش تزریق میزان برق تولیدی از این منبع در شبکه‌ی برق جزایر قناری[۲] مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها با اعمال یک مدل اقتصادی بهینه‌ساز نشان داده‌اند که می‌توان میزان تزریق انرژی برق حاصل از نیروگاه مذکور در شبکه‌ی برق را افزایش داد.[۳] همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۰۸ نوشتاری در مورد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اندازه‌ی یک نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی برای بازیابی انرژی پس زده‌شده‌ی نیروگاه بادی ارائه کرده‌اند، که در آن برای بهینه‌سازی اندازه و دیگر اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی یک سیستم هیدرولیکی برگشت‌پذیر، که برای بازیابی انرژی الکتریکی پس زده‌شده از نیروگاه بادی ساخته شده است، از یک روش عددی استفاده کرده‌اند.[۴] در سال ۲۰۱۱، نیز پژوهشی در رابطه با تحلیل سیستم تلمبه‌ی ذخیره‌یی به جهت افزایش میزان نفوذ انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های تولید نیروی مجزا با مطالعه‌ی موردی گرن کاناریا[۳] انجام شده است،

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۵/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۱۲.

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن مناسب‌ترین روش برای افزایش میزان نفوذ انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌ی برق عمومی جزایر قناری، استفاده از سیستم تلمبه‌ی ذخیره‌یی تشخیص داده شده است.[۵] همچنین مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۲، بر روی طرح‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی جهت بهبود نفوذ هر چه بیشتر انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم شبکه‌ی نیروی یونان انجام شده است، که هدف از آن بررسی عملکرد یک سیستم تلمبه‌یی ذخیره‌یی برای ادغام با نیروگاه‌های هیدروالکتریکی قدیمی یونان بوده است.[۶] در سال ۲۰۱۳، نیز یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی ترکیبی یک نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی به همراه یک نیروگاه بادی ارائه، و مسئله‌ی بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های کنترل بهینه حل، و درنهایت مثال‌های مختلفی از بهینه‌سازی ترکیبی و تحلیل بهترین راهبرد ممکن ارائه شده است.[۷]

در این نوشتار برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک با کدنویسی دودویی استفاده شده است. تابع هدف در این مسئله‌ی بهینه‌سازی، مجموع میزان اختلاف در عرضه و تقاضای انرژی برق برای یک شبانه‌روز تعریف شده است. قیود این مسئله عبارت است از: حجم بیشینه و کمینه‌ی مخازن آب، دبی بیشینه و کمینه‌ی آب در زمان پمپاژ، و عبور آب از توربین‌ها و قید پایداری عملیاتی[۴]. برای این مسئله تغییرات الگوی مصرف در یک شبانه‌روز به‌صورت ساعتی در نظرگرفته شده،[۸] و درنهایت، میزان دبی پمپاژ یا دبی آب عبوری از توربین‌ها برای ۲۴ ساعت در شبانه‌روز به‌دست آمده است.

ارائه‌ی برنامه‌ی زمانی مناسب در فاز بهره‌برداری از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی، چالش بسیار مهمی است که باید در تمامی نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به شرایط پروژه و شبکه یا شبکه‌های برقی، که نیروگاه با آنها در تعامل است، باید برنامه‌ی زمانی مناسبی برای بهره‌برداری از نیروگاه ارائه شود. پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی انجام شده است، بیشتر بر روی رابطه‌ی متقابل این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های بادی متمرکز شده است، در حالی که نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی در هر شبکه‌ی نیرویی که بین میزان عرضه و تقاضا اختلاف وجود داشته باشد، می‌تواند بهترین گزینه برای حل این مشکل باشد. کار جدیدی که در قالب این پژوهش ارائه شده است، به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی برنامه‌ی زمان‌بندی بهره‌برداری، با مطالعه‌ی موردی نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی سیاه‌بیشه است. در ادامه، نحوه‌ی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی و مطالعه‌ی موردی آن به تفصیل شرح داده شده و پس از آن نتایج مسئله ارائه و تفسیر شده‌اند.

۲. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روشی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه‌ی آن از علم ژنتیک اقتباس و با تقلید از تعدادی از فرایندهای مشاهده‌شده در تکامل طبیعی اختراع شده است و به طور مؤثری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند تا راه‌حل‌های جدید و بهبودیافته را ایجاد کند.[۹]

در مکانیزم جستجو گرچه مقدار تابع هدف تمام فضای جواب محاسبه نمی‌شود، ولی مقدار محاسبه‌شده‌ی تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط‌گیری آماری تابع هدف برای هر نقطه و در متوسط‌گیری آماری تابع هدف درکلیه‌ی زیرفضاهایی که آن نقطه به آنها وابسته بوده است، دخالت داده می‌شود و این زیرفضاها به طور موازی از نظر تابع هدف، متوسط‌گیری آماری می‌شوند. این مکانیزم را توازی ضمنی[۵] می‌گویند. این روند باعث می‌شود که جستجوی فضا به نواحی‌یی که متوسط آماری تابع هدف و امکان وجود نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق در آنجا بیشتر بوده است، سوق پیدا کند. چون در این روش برخلاف روش‌های تک‌مسیری فضای جواب به‌طور همه جانبه جستجو می‌شود، و امکان کمتری برای هم‌گرایی به یک نقطه‌ی بهینه‌ی محلی وجود خواهد داشت.[۹]

الگوریتم‌های ژنتیک با تولید نسل[۶] آغاز می‌شوند، که وظیفه‌ی ایجاد مجموعه‌ی نقاط جستجوی اولیه به نام «جمعیت اولیه»[۷] را بر عهده دارند و به طور انتخابی یا تصادفی تعیین می‌شوند. از آنجایی که الگوریتم‌های ژنتیک برای هدایت عملیات جستجو به طرف نقطه‌ی بهینه از روش‌های آماری استفاده می‌کنند، در فرایندی که به انتخاب طبیعی وابسته است، جمعیت موجود به تناسب برازندگی افراد آن برای نسل بعد انتخاب می‌شوند. سپس عمل‌گرهای ژنتیکی شامل انتخاب[۸]، پیوند (ترکیب)، جهش، و دیگر عمل‌گرهای احتمالی اعمال می‌شود و جمعیت جدید به‌وجود می‌آید. پس از آن جمعیت جدیدی جایگزین جمعیت پیشین می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد.[۹]

۳. تعریف مسئله

هدف از ساخت نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی ایجاد تعادل در شبکه‌ی برق است. منظور از ایجاد تعادل در شبکه‌ی برق، کمینه‌سازی تفاوت در میزان عرضه و تقاضای برق است. مسئله‌ی بهینه‌سازی این پژوهش با توجه به هدف اصلی احداث نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی تعریف شده است. مقدار دبی عبوری آب از تونل‌های رابط دو مخزن نیروگاه، میزان تولید و مصرف برق توسط نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی را تعیین می‌کند. اما میزان دبی باید با توجه به محدودیت‌های سیستم تعیین شود. این محدودیت‌ها شامل: حجم کمینه و بیشینه‌ی مخازن، کمینه و بیشینه‌ی دبی پمپ‌ها و توربین‌ها، ظرفیت تونل‌ها، و... است. با توجه به توضیحات داده‌شده، مسئله‌ی بهینه‌سازی به این صورت تعریف می‌شود:

«تعیین مقدار و جهت دبی آب عبوری از تونل(های) رابط دو مخزن بالادست و پایین‌دست، با هدف کمینه‌سازی میزان اختلاف در عرضه و تقاضای برق شبکه و با درنظرگرفتن محدودیت‌ها».

۱.۳. متغیر تصمیم

متغیرهای تصمیم به‌صورت درنظرگرفتن حالات مختلف خاموش و روشن بودن پمپ‌ها و توربین‌ها در ساعات شبانه‌روز در نظرگرفته شده‌اند.

۲.۳. تابع هدف

در روند اجرای بهینه‌سازی، باید مقدار تابع هدف را برای هر کروموزوم محاسبه کنیم تا بتوانیم به همراه جریمه‌کردن آنها، کروموزوم‌های خوب و بد را از هم تفکیک کنیم. همان‌طورکه در تعریف مسئله مطرح شده است، هدف از احداث نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی ایجاد تعادل در رابطه‌ی متقابل[۹] عرضه و تقاضای برق است. با توجه به موضوع ذکرشده، تابع هدف نیز در این مسئله به‌صورت کمینه‌سازی اختلاف میزان عرضه و تقاضا با ارائه‌ی یک برنامه‌ی مناسب برای بهره‌برداری از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی تعریف شده است. این تعریف به‌صورت رابطه‌ی ۱ ارائه شده است:

$$f = \sum_{i=1}^{24} (E_p^i + E_c^i + E_{psp}^i)^2 \qquad (1)$$

که در آن، E_p^i میزان انرژی تولیدی توسط شبکه از ساعت $(i-1)$اُم تا iاُم، E_c^i میزان انرژی مصرفی توسط شبکه از ساعت $(i-1)$اُم تا iاُم، و E_{psp}^i میزان انرژی

www.SID.ir

Archive of SID

تولیدی یا مصرفی توسط نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی از ساعت $(i-1)$اُم تا iاُم بر حسب مگاوات ساعت هستند.

۳.۳. قیدهای مسئله

مسئله‌ی ذکرشده در این پژوهش، ۳ قید دارد، که عبارت‌اند از: ۱. قید دبی، ۲. قید پایداری عملیاتی[۱۰]، ۳. قید حجم آب مخازن. برای اینکه بتوان هم‌زمان و با تأثیر یکسان قیدهای مذکور را در مسئله اعمال کرد، از روش نرمالایزکردن[۱۱] استفاده شده است. نرمالایزکردن باعث می‌شود تا بتوان با یک ضریب پنالتی یکسان برای تمامی قیود به جواب بهینه دست یافت و همچنین دیگر نیازی به عملیات پیچیده و زمان‌بر آنالیز حساسیت نیست. در مسئله‌ی ذکرشده از روش پنالتی برای اعمال قیود استفاده شده است.

۱.۳.۳. قید دبی

همه‌ی پمپ توربین‌ها مشخصات فنی خاصی دارند، که مقدار کمینه و بیشینه‌یی برای دبی عبوری از آنها تعیین می‌کند. به همین دلیل باید این محدودیت به‌صورت قید در مسئله تعریف شود تا بتوان مطابق آنچه که درواقعیت رخ می‌دهد، عمل شود.

۲.۳.۳. قید پایداری عملیاتی

این قید بدان معناست که بعد از یک دوره‌ی ۲۴ ساعته‌ی بهره‌برداری از نیروگاه، سیستم به شرایط اولیه‌ی آغاز بهره‌برداری بازگردانده شود. در مورد نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی، آنچه که در مورد شرایط اولیه تعیین‌کننده است، حجم مخازن در ابتدای شروع بهره‌برداری است. بنابراین، پس از پایان یک دوره‌ی بهره‌برداری از نیروگاه، باید حجم مخازن برابر با حجم آنها در ابتدای دوره باشد (رابطه‌ی ۲):

$$|V_{\circ} - V_{۲۴}| = \circ \qquad (۲)$$

۳.۳.۳. قید حجم آب مخازن

مخزن هر سدی نباید از مقدار کمینه و بیشینه‌ی آن تجاوز کند؛ لذا مخازن نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی نیز از این قاعده مستثناء نیستند. از آنجایی که در طول دوره‌ی بهره‌برداری، حجم مخازن همواره در حال کم و زیاد شدن است، لازم است که مقدار آن پس از هر دوره‌ی یک ساعته کنترل شود تا اطمینان حاصل شود که مقدار آن از مقادیر کمینه و بیشینه تجاوز نکرده است. لذا رابطه‌ی ۳ همواره باید برقرار باشد:

$$V_{\min} \langle V_i \langle V_{\max} \qquad (۳)$$

۴.۳. تابع برازندگی[۱۲]

پس از محاسبه‌ی مقدار تابع هدف و میزان جریمه‌شدگی برای هر کروموزوم، باید مقداری به هر کدام از آنها اختصاص داده شود تا بتوان تفسیر خوبی از کیفیت کروموزوم مربوط در رابطه با جواب بهینه داشت. با توجه به اینکه مسئله‌ی موردنظر، کمینه‌سازی است، برای این منظور مقدار تابع هدف و میزان جریمه‌شدگی را برای هر کروموزوم با هم جمع می‌کنیم تا مقدار تابع برازندگی برای آن به‌دست آید. این تابع به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$g = f + \alpha \times \varphi \qquad (۴)$$

که در آن، f مقدار تابع هدف، α ضریب پنالتی، φ میزان جریمه‌شدگی کروموزوم، و g مقدار تابع برازندگی برای هر کروموزوم است.

۵.۳. فرضیات مسئله

دو فرض اساسی در مسئله‌ی ذکرشده در این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. هدف فقط ایجاد تعادل در شبکه‌ی برق است و قیمت‌های متنوع برق در ساعات شبانه‌روز تأثیری در بهره‌برداری از نیروگاه نخواهند داشت.

۲. با توجه به اینکه یک دوره‌ی ۲۴ ساعته برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاه در نظر گرفته شده، فرض شده است که سرریزها در این دوره‌ی روزانه بلااستفاده خواهند ماند و در نتیجه تأثیری در روند بهره‌برداری روزانه از نیروگاه نخواهند داشت.

۴. روش حل مسئله‌ی بهینه‌سازی

در این نوشتار برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک با کدنویسی دودویی استفاده شده است.

۱.۴. تولید جمعیت اولیه

طول کروموزوم‌ها با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم تعیین می‌شود. در این مسئله هدف پیداکردن دبی پمپاژ یا دبی آب عبوری از توربین‌ها در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز برای هر کدام از تونل‌های نیروگاه سیاه‌بیشه است. از آنجا که دوره‌های یک ساعته برای حل مسئله در نظر گرفته شده‌اند، برای هر تونل ۲۴ دبی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز تعیین شده است و همچنین دو تونل انتقال آب وجود دارد، که بر روی هر تونل ۲ واحد پمپ توربین نصب شده است. پس با توجه به اینکه هدف نهایی تعیین دبی تونل‌هاست، لذا ۴۸ متغیر تصمیم داریم. از طرفی بر روی هر تونل، ۲ واحد پمپ توربین نصب شده است و برای اینکه بتوان تمامی حالت‌ها را پوشش داد، برای هر متغیر تصمیم، ۲ بیت در نظر گرفته شده است که با توجه به اصول برنامه‌نویسی دودویی، ۴ حالت موردنظر تأمین خواهد شد (جدول ۱). با توجه به توضیحات ارائه‌شده، در نهایت طول کروموزوم‌های مسئله برابر با ۹۶ بیت است.

۲.۴. محاسبه‌ی تابع هدف

با توجه به رابطه‌ی ارائه‌شده در بخش تعریف مسئله، محاسبه‌ی تابع هدف ۳ بخش دارد.

۱.۲.۴. محاسبه‌ی E_p^i

این پارامتر با استفاده از اخبار منتشره در سایت وزارت نیرو و به مقدار ثابت ۶۹۰۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است.[۱۰]

جدول ۱. نحوه‌ی کُدکردن حالات ممکن در کدنویسی دودویی.

حالت	متغیر تصمیم		توضیح حالت
	بیت اول	بیت دوم	
۱	۰	۰	یک واحد در حالت پمپ و دیگری خاموش است.
۲	۱	۰	هر دو واحد به‌صورت پمپ است.
۳	۰	۱	یک واحد در حالت توربین و دیگری خاموش است.
۴	۱	۱	هر دو واحد به‌صورت توربین است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲.۲.۴. محاسبه‌ی E_c^i

در مورد این پارامتر نیز با ایجاد تناسب بین مقدار تولید و همچنین الگوهای بین‌المللی مصرف[۱۳]، میزان مصرف انرژی برق در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت مقادیری که در شکل ۱ به همراه مقدار تولید ارائه شده است، به‌کار برده می‌شود:[۸]

۳.۲.۴. محاسبه‌ی E_{psp}^i

برای محاسبه‌ی این پارامتر دو حالت ممکن است رخ دهد: ۱. حالت پمپاژ، ۲. حالت توربین.

۱. **حالت پمپ:** برای محاسبه‌ی انرژی مصرفی پمپ از رابطه‌ی ۵ استفاده می‌شود:[۱۱]

$$E_{psp}^i = PT/\eta \qquad (۵)$$

که در آن، P توان مصرفی پمپ بر حسب مگاوات، T زمان عملیات پمپاژ بر حسب ساعت، و η راندمان پمپ است.

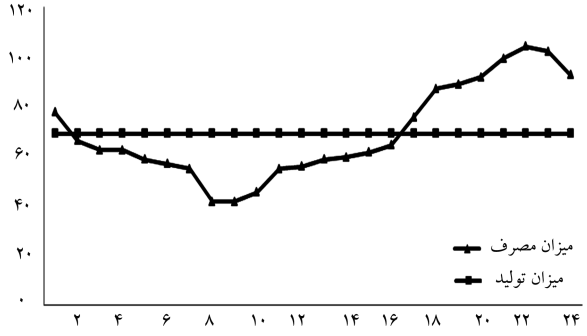
برای محاسبه‌ی توان پمپ ابتدا باید هد خالص را محاسبه کرد و با توجه به منحنی مشخصه‌ی پمپ، دبی پمپاژ و توان مصرفی پمپ را به‌دست آورد. هد خالص برابر با مجموع هد استاتیکی و هد اصطکاکی است. با فرض مقداری برای حجم اولیه‌ی مخازن و با داشتن منحنی حجم ـ ارتفاع برای هر دو مخزن، تراز هرکدام از مخازن به‌دست می‌آید و با به‌دست‌آوردن اختلاف آنها، هد استاتیکی محاسبه می‌شود. میزان هد اصطکاکی نیز از رابطه‌ی تجربی ۶ محاسبه می‌شود:

$$H_f = kQ^2 \qquad (۶)$$

که در آن، H_f هد اصطکاکی بر حسب متر، Q مقدار دبی پمپاژ بر حسب مترمکعب بر ثانیه، و k ضریب ثابت رابطه است که بسته به شرایط مختلف مقادیر متفاوتی دارد.

۲. **حالت توربین:**

- محاسبه‌ی دبی توربین: میزان دبی عبوری از توربین‌ها بستگی به میزان بازشدگی دریچه‌ها[۱۴] دارد و مقدار آن با توجه به مشخصات فنی توربین تعیین می‌شود. اما برای دست‌یابی به وحدت رویه در این زمینه، فرض شده است که میزان دبی توربین‌ها مقداری در نظر گرفته شود که در آن، هد بیشینه‌ی راندمان را داشته باشد.
- محاسبه‌ی راندمان توربین: با توجه به اینکه میزان دبی طوری در نظرگرفته شده است که توربین‌ها با بیشینه‌ی راندمان ممکن عمل کنند، مقدار راندمان آنها نیز با توجه به فرض مذکور و مشخصات فنی توربین به‌دست آمده است.



شکل ۱. میزان تولید و مصرف انرژی برق در ساعات شبانه‌روز.

- محاسبه‌ی توان توربین: برای محاسبه‌ی توان توربین، رویه‌یی[۱۵] در فضای سه بُعدی برای تخمین مقدار آن برازش شده و با داشتن هد و دبی مقدار توان به‌دست آمده است.
- محاسبه‌ی انرژی تولیدی توسط توربین: با داشتن توان، زمان و راندمان میزان انرژی تولیدی توسط توربین از رابطه‌ی ۷ به‌دست آمده است:

$$E_{psp}^i = \eta_t \eta_g PT \qquad (۷)$$

که در آن، P توان تولیدی پمپ بر حسب مگاوات، T زمان عملیات پمپاژ بر حسب ساعت، η_t راندمان توربین، و η_g راندمان ژنراتور (برابر با مقدار ثابت ٪۹۵)[۱۲] است.

۳.۴. مشخصات الگوریتم ژنتیک

مشخصات الگوریتم ژنتیک اعمال‌شده در مسئله‌ی بهینه‌سازی ذکرشده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- اندازه‌ی جمعیت: اندازه‌ی جمعیت ۲۰۰ کروموزوم در نظرگرفته شده است.
- عمل‌گر انتخاب: از عمل‌گر انتخاب رقابتی با شرکت‌دادن تعداد ۱۰ کروموزوم در هر رقابت استفاده شده است.
- عمل‌گر تزویج: از عمل‌گر تزویج یا ترکیب دو نقطه‌یی استفاده شده است.
- عمل‌گر جهش: از عمل‌گر جهش یکنواخت با احتمال جهش ۰٫۰۱ استفاده شده است و نحوه‌ی اعمال آن به این صورت بوده است که اگر بیتِ موردنظر برابر با ۱ باشد مقدار آن صفر می‌شود و بالعکس.
- نخبه‌گرایی: در این مسئله، نخبه‌گرایی نیز اعمال شده است و در طی هر نسل، بهترین عضو هر جمعیت، حفظ شده و در جمعیت بعد حضور داشته است؛ به عبارت دیگر، عضوی که بالاترین تطابق را داشته است، به طور خودکار به جمعیت جدید منتقل شده است.
- شرط توقف: در این مسئله، رسیدن به تعداد بیشینه‌ی ۳۰۰ نسل، شرط توقف بوده است.

۵. حل مسئله‌ی نمونه

در این نوشتار نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌یی سیاه‌بیشه به‌عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده است، که در ابتدا به معرفی کامل نیروگاه مذکور پرداخته شده است:

این تذکر لازم است که تمامی اطلاعات این بخش از ۳ منبع دریافت شده است: ۱. وب سایت شرکت کیسون به‌عنوان پیمانکار پروژه،[۱۳] ۲. مراجعه‌ی حضوری و همکاری با شرکت مشانیر به‌عنوان مشاور پروژه، و ۳. وب سایت رسمی شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران به‌عنوان کارفرمای پروژه.[۱۴]

۱.۵. شرح کلی پروژه

پروژه‌ی تلمبه‌ی ذخیره‌یی سیاه‌بیشه، از دو سد سنگریزه‌یی با رویه‌ی بتنی[۱۶]، دو تونل انتقال آب، یک مغار نیروگاه،[۱۷] و تجهیزات مربوط و یک سیستم تزریق تشکیل شده است. هدف اصلی این پروژه، ایجاد تعادل در سیستم تولید انرژی کشور است. این مجموعه شامل ظرفیت نصب‌شده‌ی ۱۰۰۰ مگاوات است و در زمان اوج مصرف برق، نقشی اساسی خواهد داشت.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مشخصات مخازن.

مخزن	حجم بیشینه (m^3)	حجم کمینه (m^3)	تراز بیشینه (m)	تراز کمینه (m)	حجم اولیه (m^3)
مخزن بالادست	۴۳۲۳۹۳۰	۶۶۲۷۵۱	+۲۴۰۷٫۶	+۲۳۷۶	۱۰۲۸۸۶۹
مخزن پایین‌دست	۶۷۱۲۷۷۹	۲۷۷۰۲۶۶	+۱۹۰۵٫۲	+۱۸۸۵٫۵	۶۳۴۶۶۶۱

مشخصات مخازن بالادست و پایین‌دست در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به الگوی تولید و مصرف برق باید در ابتدای دوره، یعنی ساعت ۰۰:۰۰ تا ۰۱:۰۰، توربین‌ها و از ساعت ۰۱:۰۰ به بعد، پمپ‌ها عمل کنند. به همین دلیل برای حجم اولیه‌ی مخازن فرض شده است که مخزن بالادست ۱۰٪ بیشتر از حجم کمینه و مخزن پایین‌دست، دست‌کم ۱۰٪ کمتر از حجم بیشینه‌ی خود آب داشته باشند.

برای هر دو سد از سرریز آزاد پلکانی استفاده شده است، که ظرفیت تخلیه‌ی سرریز سد بالادست، ۲۰۳ و سد پایین‌دست ۸۶۰ مترمکعب بر ثانیه است. این تذکر لازم است که سرریز سدهای بالادست و پایین‌دست به ترتیب درون رودخانه‌های کندوان و چالوس تخلیه می‌شوند. برای انتقال آب از سد بالا به پایین و بالعکس، از دو تونل آب استفاده می‌شود که ظرفیت آنها در حالت توربین ۱۳۰ مترمکعب بر ثانیه و در حالت پمپ ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه است.

دو رودخانه‌ی چالوس و کندوان در حوضه‌ی آب‌خیز مخازن نیروگاه سیاه‌بیشه وجود دارند. رودخانه‌ی چالوس به سد پایین‌دست و رودخانه‌ی کندوان به سد بالادست می‌ریزد. برای اعمال در مسئله، میانگین دبی سالانه در نظرگرفته شده و علاوه بر آن، برای تأمین دبی زیست‌محیطی الزام شده است تا دست‌کم مقدار ۰٫۲۵ مترمکعب بر ثانیه از مخزن پایین‌دست نیز رها شود، که این مقدار برای مخزن پایین‌دست در روند حل مسئله در نظرگرفته شده است.

نیروگاه سیاه‌بیشه دو تونل انتقال آب دارد که بر روی هر تونل ۲ واحد پمپ توربین قرار داده شده است. در کل ۴ واحد پمپ توربین با توان ۲۶۰ مگاوات در این نیروگاه عمل می‌کنند، که بر روی هرکدام نیز ژنراتوری با توان ۲۶۰ مگاوات نصب شده است. در ادامه، مشخصات تجهیزات به‌صورت دقیق ارائه شده است.

الف) پمپ‌ها

مشخصات فنی پمپ‌ها با منحنی مشخصه‌ی آنها تعیین می‌شود. این تذکر لازم است که براساس منحنی مشخصه و اعلام شرکت سازنده‌ی تجهیزات، حدود مجاز دبی برای پمپ‌ها از $36 m^3/s$ الی $50 m^3/s$ متغیر است.

ب) توربین‌ها

نکته‌ی قابل ذکر در مورد منحنی مشخصه‌ی توربین این است که توربین فقط بر روی خطوط منحنی مشخصه عمل نمی‌کند، بلکه به‌صورت پیوسته در تمام نقاط صفحه عمل می‌کند. به همین دلیل برای استفاده از این منحنی‌ها یا بهتر است گفته شود رویه‌ها، رویه‌ی توان برازش داده‌شده است. حدود مجاز دبی برای توربین از $31 m^3/s$ الی $62 m^3/s$ متغیر است.

۲.۵. نتایج حل مسئله‌ی نمونه

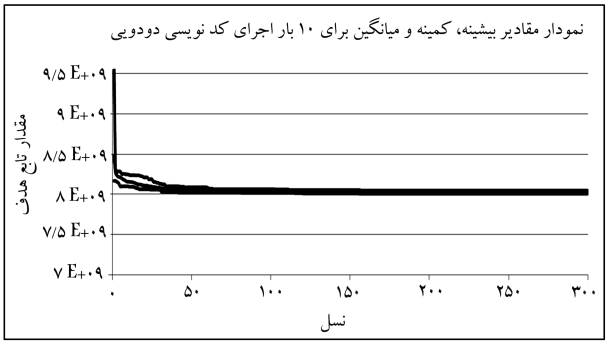
برای اینکه دید مناسبی نسبت به مقدار تابع هدف پیدا شود، باید مقدار کمینه و بیشینه‌ی آن در شرایط ایده‌آل تعیین شود. برای مقدار کمینه‌ی تابع هدف فرض شده است که نیروگاه سیاه‌بیشه بدون هیچ قیدی و با تمام توان در ۲۴ ساعت شبانه‌روز مورد بهره‌برداری قرار گیرد. با این فرض، مقدار تابع هدف $7/63 \times 10^9 (Mwh)^2$ به‌دست آمده است. برای مقدار بیشینه‌ی تابع هدف فرض شده است که نیروگاه سیاه‌بیشه به‌طورکل وجود ندارد و هیچ تعادلی بین میزان تولید و تقاضای برق صورت نمی‌پذیرد. با این فرض مقدار تابع هدف، $8/41 \times 10^9 (Mwh)^2$ به‌دست آمده است. با توجه به قیدهای مسئله، مقدار تابع هدف در طی عملیات بهینه‌سازی باید مقداری بین دو عدد مذکور به‌دست آید.

پس از ۱۰ بار اجرای برنامه، بهترین پاسخ‌های هر نسل از جمعیت برای هر بار اجرا ثبت و مقادیر بیشینه، کمینه، و میانگین نسل اول، نسل دوم، و الی آخر از هر ۱۰ اجرا تعیین شده است. لذا ۳ مقدار بیشینه، کمینه، و میانگین برای ۳۰۰ نسل در اختیار است و نمودار آنها رسم شده است (شکل ۲). بهترین پاسخ مربوط به دومین اجرای برنامه است، که مقدار تابع هدف، $8/01 \times 10^9$ است. در جدول ۳، مقادیر تابع هدف و زمانی که این اجراها برای ۱۰ بار اجرای برنامه به طول انجامیده و در جدول ۴، مقادیر دبی به‌دست‌آمده در دومین اجرا ارائه شده است. لازم به یادآوری است که مقادیر دبی مثبت، مربوط به پمپاژ و مقادیر دبی منفی، مربوط به دبی عبوری از توربین‌هاست.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که نیروگاه ۱۱ ساعت به‌صورت پمپ و ۱۳ ساعت به‌صورت توربین مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. اما برای مثال، شکل ۱ نشان می‌دهد که به‌صورت منطقی باید در ساعت ۷ الی ۸، نیروگاه به‌صورت پمپ عمل کند؛ اما نتایج عملکرد پمپ را به‌صورت توربین نشان می‌دهند. علت این اختلاف وجود قیدهای مسئله علی‌الخصوص حجم محدود مخازن است. در نهایت نیروگاه، ۱۰ ساعت به‌صورت پمپ و ۸ ساعت به صورت توربین به شکل بهینه مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

اما مقدار $8/01 \times 10^9 (Mwh)^2$ به چه معناست؟ همان‌طورکه قبلاً عنوان شده است، بیشینه‌ی مقدار تابع هدف برابر با $8/41 \times 10^9 (Mwh)^2$ است و بنابراین با برنامه‌ی بهره‌برداری که این برنامه‌های کدنویسی برای نیروگاه سیاه‌بیشه ارائه کرده‌اند، این مقدار به $8/01 \times 10^9 (Mwh)^2$ کاهش یافته است. از واحد تابع هدف بر می‌آید که با گرفتن ریشه‌ی دوم، اختلاف مقدار بیشینه و مقدار تابع هدف معنای مشخص‌تری پیدا کرده است.

$$\sqrt{(8/41 \times 10^9 - 8/01 \times 10^9)} = 20000 \ \text{Mwh} \qquad (8)$$



شکل ۲. نمودار مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. مقادیر تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای کدنویسی دودویی.

شماره‌ی اجرا	۱	۲	۳	۴	۵
مقدار تابع هدف $(Mwh)^2$	$۸/۰۲ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۱ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۴ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۲ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۴ \times ۱۰^۹$
زمان اجرا (S)	۳۶	۳۳	۳۸	۳۲	۳۱
شماره‌ی اجرا	۶	۷	۸	۹	۱۰
مقدار تابع هدف $(Mwh)^2$	$۸/۰۳ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۵ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۴ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۱ \times ۱۰^۹$	$۸/۰۴ \times ۱۰^۹$
زمان اجرا (S)	۳۵	۳۴	۳۲	۳۶	۳۴

جدول ۴. مقادیر دبی برای بهترین پاسخ کدنویسی دودویی.

زمان	دبی تونل راست (m^3/s)	دبی تونل چپ (m^3/s)	زمان	دبی تونل راست (m^3/s)	دبی تونل چپ (m^3/s)
۱ – ۰	−۱۱۸/۵۱	۹۴/۶۸	۱۳ – ۱۲	۴۳/۵۱	۴۳/۵۱
۲ – ۱	−۵۹/۷۷	۹۵/۲۱	۱۴ – ۱۳	۸۴/۹۸	−۶۰/۵۳
۳ – ۲	۴۷/۸۴	−۶۰/۰۴	۱۵ – ۱۴	−۱۲۳/۰۴	۸۴/۷۵
۴ – ۳	−۱۱۸/۵۰	۹۴/۶۹	۱۶ – ۱۵	۸۵/۱۴	۴۳/۱۴
۵ – ۴	−۱۱۸/۱۶	۴۸/۲۶	۱۷ – ۱۶	۴۲/۳۴	۵۹/۹۰
۶ – ۵	۹۶/۸۸	−۵۹/۲۱	۱۸ – ۱۷	−۶۰/۰۲	۴۲/۴۷
۷ – ۶	−۵۹/۵۲	۴۸/۶۴	۱۹ – ۱۸	۴۲/۵۹	−۱۲۲/۳۰
۸ – ۷	۹۶/۲۰	۹۶/۲۵	۲۰ – ۱۹	−۶۰/۵۶	−۱۲۳/۱۹
۹ – ۸	۹۲/۲۳	۹۲/۲۸	۲۱ – ۲۰	−۱۲۳/۳۶	−۱۲۳/۴۵
۱۰ – ۹	۴۵/۴۴	۴۵/۴۴	۲۲ – ۲۱	−۶۱/۷۲	−۱۲۲/۰۶
۱۱ – ۱۰	۸۸/۶۸	۸۸/۷۳	۲۳ – ۲۲	−۱۲۰/۵۶	−۶۱/۰۱
۱۲ – ۱۱	۸۷/۰۶	۴۴/۱۲	۲۴ – ۲۳	−۵۹/۹۴	۴۷/۹۹

در واقع این برنامه‌ریزی باعث شده است که ۲۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی در شبانه‌روز که باید در شبکه مستهلک شود، توسط این سیستم مورد بهره‌برداری قرار گیرد و از تبعات ناشی از استهلاک برق در شبکه یا کمبود برق در آن جلوگیری به عمل آید.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته و برای این منظور، این مراحل طی شده است:

- ابتدا به بررسی شرایط نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی در کشور و جهان پرداخته شده است. از نظر عملی و وجود نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی در سطح بین‌الملل، پیشرفت‌های چشم‌گیری صورت گرفته است. اما از نظر علمی، زمینه‌های پژوهشی زیادی در این حوزه موجود است، که فضای کافی برای کارهای پژوهشی دارند.
- از آنجا که هدف از احداث نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی، ایجاد تعادل در شبکه است؛ هدف اصلی این پژوهش نیز ارائه‌ی برنامه‌ی بهره‌برداری بهینه برای ایجاد بهترین تعادل در شبکه‌ی برق است.
- پس از مطالعات کافی در زمینه‌ی الگوریتم ژنتیک و تعریف مسئله و محدودیت‌های آن، بهینه‌سازی مسئله با این الگوریتم و با استفاده از نرم‌افزار متلب[18] انجام شده است.
- برای بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک از کدنویسی دودویی استفاده شده است.
- در الگوریتم ژنتیک، از عمل‌گر انتخاب رقابتی با شرکت ۱۰ کروموزوم در هر رقابت، از عمل‌گر تزویج دو نقطه‌یی، از عمل‌گر جهش یکنواخت با احتمال جهش ۰/۰۱ و در نهایت از نخبه‌گرایی با حفظ بهترین کروموزوم برای نسل آینده استفاده شده است. بهترین پاسخ این روش، $۸/۰۱ \times ۱۰^۹ (Mwh)^2$ در زمان ۳۳ ثانیه به‌دست آمده است.

برای کارهای آتی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. بهینه‌سازی دو هدفه‌ی مسئله با درنظرگرفتن اهداف ایجاد بهترین تعادل در شبکه‌ی برق به همراه بیشینه‌ساختن درآمد نیروگاه.
۲. حجم اولیه‌ی مخازن نیز به‌عنوان متغیر تصمیم در نظرگرفته شوند و مسئله حل شود.
۳. تأثیر استفاده از پمپ ـ توربین‌های چند سرعته در بهره‌برداری از نیروگاه‌های تلمبه‌ی ذخیره‌یی به‌عنوان یک مسئله‌ی جدید در دنیا.

www.SID.ir

Archive of SID

پانوشت‌ها

1. wind plants
2. Canary islands
3. Gran Canaria
4. stationary
5. implicit parallelism
6. seeding
7. initial population
8. selection
9. interaction
10. stationary
11. Normalize
12. fitness function
13. international consumption pattern
14. gate
15. surface
16. concrete-face rock fill dam (CFRD)
17. power cavern
18. Matlab

منابع (References)

1. Tang, J. and Huang, W.V. "Hydrothermal scheduling problems with pumped-storage hydro plants", *Computers* & it Industrial Engineering, **23**(1), pp. 129-132 (1992).
2. Yen, M. and Zhang, S. "An efficient method pumped-storage planning and evaluation", *Electric Power Systems Research*, **42**(1), pp. 63-7 (1997).
3. Bueno, C. and Carta, J. "Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **10**(4), pp. 312-340 (2006).
4. Anagnostopoulos, J. and Papantonis, D. "Simulation and size optimization of a pumped–storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy", *Renewable Energy,* **33**(7), pp. 1685-1694 (2008).
5. Padrón, S., Medina, J. and Rodrıguez, A. "Analysis of a pumped storage system to increase the penetration level of renewable energy in isolated power systems. Gran Canaria: A case study", *Energy,* **36**(12), pp. 6753-6762 (2011).
6. Anagnostopoulos, J.S. and Papantonis, D.E. "Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece", *Energy,* **45**(1), pp. 416-423 (2012).
7. Bayón, L. and et al. "Mathematical modelling of the combined optimization of a pumped-storage hydro-plant and a wind park", *Mathematical and Computer Modelling*, **57**(7), pp. 2024-2028 (2013).
8. Hendricks, W., Koenker, R. and Podlasek, R. "Consumption patterns for electricity", *Journal of Econometrics,* **5**(2), pp. 135-153 (1977).
9. Shah hosseini, H. Mousavi, MR. and Molla Jafari, M., "Revolutionary Algorithms" , Iran university of Science and Technology Publication (2010).
10. http://www.moe.gov.ir/.
11. Streeter, V.L., Wylie, E.B. and Bedford, K.W, *Fluid Mechanics*, WCB, McGraw-Hill (1998).
12. Sumereder, C. "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis", *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, **15**(3), pp. 678-685 (2008).
13. http://www.kayson-ir.com/siahbisheh/fa_project_ summary.aspx.
14. http://fa.iwpco.ir/Siahbishe/TechInfo.aspx.

www.SID.ir