



مروری بر روش‌های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی

بهروز نجفی

کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، باشگاه پژوهشگران جوان، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

behroz1.najafi1@gmail.com

ارسال: مرداد ۹۷ پذیرش: مهر ۹۷

چکیده

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است که با توجه به محدودیت‌ها و پارامترهای زیاد مطرح در آن، از پیچیدگی بالایی برخوردار است. این مسئله به مشخص کردن وضعیت روشن یا خاموش بودن واحدهای نیروگاهی حرارتی و مقدار توان تولید آنها در بازه‌های زمانی برنامه‌ریزی می‌پردازد. مقصود کلی از در مدار قرار گرفتن نیروگاهها، مینیمم کردن هزینه بهره‌برداری کل سیستم، با در نظر قرار گرفتن همه قیودی است که سطح مشخصی از امنیت را تامین می‌کند. مشخص کردن زمان مناسب ورود یا خروج نیروگاهها به مدار از بین حالت‌های ممکن، صرفه جویی عظیم اقتصادی در پی خواهد داشت. همچنین ایجاد ذخیره چرخان مناسب در سیستم قدرت، سیستم را از نظر امنیت در وضعیت مطلوبی نگه می‌دارد. در این مقاله سعی بر آن است که صرفاً با مرور کارهای انجام شده در این زمینه، روش‌های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: Unit Commitment (UC)، تعیین وضعیت واحدها، حداقل نمودن هزینه بهره‌برداری از شبکه، روش‌های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها

۱- مقدمه

مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاهها، در واقع برنامه‌ریزی ورود و خروج واحدها با در نظر گرفتن قیودی است که به موجب آن، واحدهای غیر ضروری خاموش گردد تا بهره‌بردار سیستم قدرت حداقل هزینه ممکن را متحمل شود. بدون بررسی شرایط و مطالعه تمام جوانب کار، بهره‌بردار سیستم قدرت، نمی‌تواند به راحتی واحدهای معینی را در مدار قرار داده و آنها را مورد بهره‌برداری قرار بدهد. بنابراین ضروری است که از قبل تمهیدات لازم برای این موضوع اندیشیده شود و بر مبنای بار پیش‌بینی شده و محدودیت‌های موجود، واحدهایی که باید در مدار قرار گیرند و آنهایی که باید از مدار خارج شوند، تعیین گردند. هنگامی که حداقل نمودن هزینه مد نظر است، واحدهای ارزان ابتدا وارد مدار می‌شوند. واحدهای گران هم، هنگامی در مدار قرار می‌گیرند که بار زیاد باشد. اگر واحدی روشن است، آن را با ۱ و چنانچه خاموش باشد آن را با صفر نشان می‌دهیم.

^۱ Unit Commitment (UC)

حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها، با هدف تعیین وضعیت واحد های تولید انرژی الکتریکی موجود در یک شبکه قدرت انجام می‌گیرد. مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی که در آن، مقدار دهی واحد های روشن تحت عنوان پخش اقتصادی بار^۲ صورت می‌گیرد. عمدتاً یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی پیچیده با ابعاد بالا و دارای قیود خطی و غیرخطی است. پیشینه تحقیق گواه بر آن است که در مدار قرار دادن نیروگاه‌ها از یک سو به منظور حداقل کردن هزینه تولید و از سوی دیگر به منظور حداکثر کردن سود شرکتهای تولیدی، انجام می‌گیرد[۱]. مسئله UC در برگیرنده برنامه روزانه کار نیروگاه‌هاست که در آن به منظور تامین تقاضای پیش بینی شده و رزرو چرخان^۳ مورد نیاز در بازه زمانی از یک روز تا یک هفته، باید واحدهای تولیدی که برای تولید مقرون به صرفه ترین واحد هستند، با در نظر گرفتن محدودیت های فنی و عوامل اقتصادی تعیین شوند [۲]. این مسئله حاوی متغیرهای گسسته و پیوسته است که وضعیت روشن یا خاموش بودن نیروگاه‌ها و نیز توزیع اقتصادی بار میان واحدها را نشان می‌دهد [۳]. هدف UC مینیمم کردن هزینه تمام شده، واحدهای نیروگاهی با وجود تعداد زیادی از قیود واحدها و سیستم در مدت برنامه‌ریزی است. مسئله کلی UC می‌تواند به دو زیر مسئله تقسیم شود. یکی مسئله ترکیبی برنامه ریزی غیرخطی صحیح برای تعیین حالت روشن و یا خاموش واحدهای تولید برای هر ساعت از دوره پخش بار (معمولاً ۲۴ ساعت) با توجه به قیود موجود می‌باشد و مسئله دیگر برنامه‌ریزی درجه دوم یعنی پخش بار اقتصادی بین واحدها می‌باشد که حل این زیر مساله نیز وابسته به قیود دیگری است که باید در نظر گرفته شوند [۱]. حل همزمان هر دو مسئله یک مساله بسیار پیچیده است. دشواری مسئله متناسب با تعداد واحدها و قیود افزایش می‌یابد. [۱]. UC بعنوان دو مسئله بهینه سازی مرتبط به هم مطرح می‌شود. اولین مسئله ترکیبی است و دومین مسئله، برنامه ریزی غیر خطی است. حل دقیق UC می‌تواند با شمارش کامل همه ترکیبات ممکن واحد های تولید بدست آید که عدد بسیار بزرگی خواهد بود. سپس مسئله پخش بار اقتصادی برای هر ترکیب ممکن حل می‌شود. اساساً ابعاد بالای فضای مسئله، حل آنرا دشوار می‌سازد [۱].

نتایج این پژوهش صرفاً از طریق مطالعه رفرنس‌ها و جمع کردن نتایج مشترک در بین روش‌های بکار رفته در هر کدام از آن‌ها بدست آمده است تا یک دید کلی در مورد مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها بدست آید. ساختار مقاله بدین گونه است که در بخش دوم مروری بر مطالعات انجام شده برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها بیان شده است. در بخش سوم روش های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها معرفی می‌شود. روش‌های نگهداری یک واحد حرارتی نیز در بخش چهارم ترسیم شده است. مفهوم مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها، تعریف مسئله UC و بیان قیود آن در بخش پنجم و ششم آورده شده است.

۲- مروری بر مطالعات انجام شده برای حل مسئله UC

تا قبل از سال ۱۹۶۰ مسئله UC فقط به بحث توزیع اقتصادی بار محدود می‌شد. در آن زمان، روش شناخته شده کوهن-تاکر وضعیت اقتصادی بهینه را مشخص می‌کرد. هنگامی که این شرایط برآورده می‌شد، کلیه ی نیروگاه هایی که در مدار بودند، به غیر از نیروگاه هایی که به صورت مؤثر با حداکثر توان در شبکه بودند، با توجه به میزان سوخت‌شان بارگذاری می‌شدند. بر مبنای روش کوهن - تاکر چندین راه حل برای مسئله UC پایه گذاری گردید که از جمله آنها می‌توان ابداع روش تکرار لامبدا و روش گرادیان برای نیروگاه های حرارتی را نام برد [۳].

در [۴-۵] از روش های کدبندی باینری برای حل مسئله UC استفاده شده است. همچنین می‌توان به کاربرد الگوریتم های تکاملی کوانتومی [۶]، باکتریال [۷]، ژنتیک [۸]، برنامه ریزی تکاملی [۹]، جهش قورباغه [۱۰]، سرد شدن تدریجی فلزات [۱۱]، تجمع مورچگان [۱۲]، و سایر روش های هوشمند [۳۸-۲۸، ۲۰-۱۳]، برای حل مسئله UC اشاره کرد. علاوه بر این در [۲۱]، تکنیک های ریاضی و هوشمند برای حل مسئله UC استفاده شده است. در [۲۲-۲۳]، روشی جدید مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی تجمع زنبور

^۲ Economic Dispatch (ED)

^۳ تفاضل توان قابل تولید و توان تولید شده واحدهای در مدار در زمان پیک یا تفاوت بین ظرفیت بالقوه فعال و مجموع بار و تلفات سیستم

عسل (ABC) برای حل مسئله UC ارائه شده است. در بخش بعدی به طور طبقه بندی شده‌ای روش های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها در منابع مختلف بررسی شده است.

۳- معرفی روش های حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها

روش های مختلفی برای حل بهینه مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاهها بکار گرفته شده‌اند. هر یک از این روش ها شرایط و خواصی دارند که کاربرد آنها را در مسائل بخصوص، ممکن می سازد. بطور کلی بنا به [۴۲]، روش های حل مسئله UC به سه دسته تقسیم می شوند:

۳-۱- روش های کلاسیک

روش های کلاسیک برای حل مسئله UC شامل روش های لیست حق تقدم^۴ [۲۴]، آزادسازی لاگرانژ^۵ [۲۵]، برنامه ریزی دینامیکی^۶ [۲۶]، برنامه ریزی خطی مرکب عدد صحیح [۲۷] و یکایک شماری [۴۳]^۷ و ... است. این روش ها به لحاظ همگرایی عددی و نیز کیفیت پاسخ مقبولیت بالایی ندارند.

۳-۲- روش های هوشمند یا روش های هوش مصنوعی

این دسته جزء، روش های جستجوی مبتنی بر جمعیت هستند که هر کدام از آنها، مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. بیشتر این روشها به دلیل اینکه مبتنی بر تکرار و حرکت های تصادفی اند، زمان اجرای نسبتا طولانی دارند. علاوه بر آن، این روشها از توانمندی بالایی در ارضا قیود غیرخطی و ایجاد پاسخ های با کیفیت برخوردارند. اما در صورت افزایش ابعاد مساله، مشکلات زمانی و کیفیت پاسخ بروزی کنند. از جمله روش های هوشمند که برای حل مسئله UC بکار رفته می توان به روش های الگوریتم ژنتیک [۲۸]، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات [۲۹]، الگوریتم تکامل تفاضلی [۳۰]، الگوریتم جهش قورباغه [۳۱]، الگوریتم کلونی زنبور عسل [۳۲]، الگوریتم کرم شتاب [۳۳]، الگوریتم جستجوی خفاش [۳۴]، الگوریتم تکاملی کوانتومی [۳۵]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۳۶]، الگوریتم علف های هرز [۳۷]، الگوریتم جستجوی هارمونی [۳۸]، اشاره کرد.

۳-۳- روش های هیبرید یا ترکیبی

از ادغام روش های دیگر به دست آمده‌اند. در استفاده از روش های ترکیبی سعی در تقلیل مشکلات هر دو طیف از روش های کلاسیک و هوشمند می شود. از جمله روش های هیبرید که برای حل مسئله UC بکار رفته می توان روش های همچون آرام سازی لاگرانژ بر پایه شبکه هاپفیلد [۳۹]، الگوریتم هیبرید تاگوچی-کلونی مورچه [۴۰]، آرام سازی لاگرانژ و الگوریتم تکاملی [۴۱]، الگوریتم جستجوی خفاش در ادغام با روشهای اصلاحی و اکتشافی [۴۲] را یاد آور شد. روشی که هر شرکت یا هر منطقه برای حل مسئله UC، انتخاب می کند، به شرایط خاصی نظیر نوع و تعداد واحدهای آبی، تلمبه ذخیره ای، وجود محدودیت های استفاده اجباری از سوخت، قراردادهای قطع بار یا مدیریت بار و... بستگی دارد.

۴- روش های نگهداری یک واحد حرارتی

دو روش، جهت نگهداری یک واحد حرارتی هنگام توقف آن وجود دارد. روش اول اجازه می دهد که دیگ بخار کاملا سرد شده و در صورت نیاز مجدد به راه اندازی، درجه حرارت را دوباره بالا برد. در روش دوم که به روش گرم موسوم است انرژی کافی به

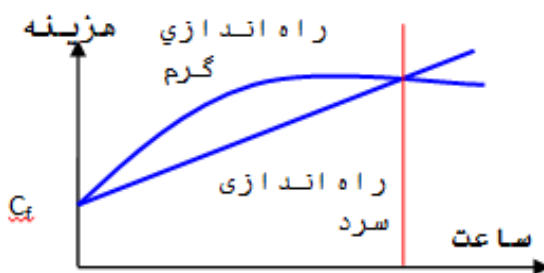
⁴ Priority List

⁵ Lagrangean Relaxation

⁶ Dynamic Programming

⁷ Exhaustive Enumeration

دیگ بخار داده می‌شود به طوری که درجه حرارت در حالت معمول بهره‌برداری باقی بماند، هزینه‌های این دو روش (راه‌اندازی سرد یا گرم) با هم مقایسه می‌شود تا بهترین روش انتخاب گردد [۱]. بنا به [۱]، نمودار هزینه راه‌اندازی بر حسب ساعت به صورت زیر است:



شکل ۱- نمودار هزینه راه‌اندازی

همچنانکه در شکل (۱) نشان داده شده است، هزینه راه‌اندازی گرم تا حد مشخصی از ساعات، کمتر از هزینه راه‌اندازی به روش سرد است [۱].

۵- مفهوم مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها، از برنامه ریزی تولید ساعت به ساعت واحدهای نیروگاهی، برای یک روز الی یک هفته (۲۴ تا ۱۶۸ ساعت) انجام می‌شود. این برنامه ریزی، بر اساس منحنی پیش بینی بار باید چنان باشد که اولاً هزینه بهره‌برداری را حداقل نماید ثانیاً قیود و محدودیت‌های تولید شبکه را برآورده سازد. ثالثاً با توجه به توزیع جغرافیایی تولید و ظرفیت‌های انتقال قدرت و خروج برخی از واحدها برای انجام تعمیرات، واحدهای تعمیرات برای راه‌اندازی مشخص شود. رابعاً برنامه ریزی باید ضمن حداقل کردن هزینه، تأمین کننده نیاز مصرف و ذخیره مورد نیاز و محدودیت‌های دیگر نیز باشد [۴۴]. اطلاعات مورد نیاز جهت برنامه ریزی واحدها را می‌توان به صورت زیر شمرد:

۱- منحنی بار پیش بینی شده در دوره زمانی مورد نظر

۲- هزینه‌های تولید واحدهای آماده بهره‌برداری

۳- محدودیت‌های واحدها و شبکه

ورود و خروج واحدها با توجه به تغییرات بار در شبکه یکی از راه‌های بهره‌برداری بهینه و صرفه‌جویی در هزینه تولید است. هزینه تولید شامل هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی و هزینه خاموش شدن است [۴۴]. هزینه سوخت یک تابع درجه دوم از توان تولیدی واحد است که با توجه به اندازه‌گیری و آزمایش‌هایی که روی هر واحد صورت می‌گیرد به دست می‌آید. هزینه راه‌اندازی واحد، هزینه مورد نیاز برای راه‌اندازی واحد از حالت خاموش است که یک تابع نمایی از زمان خاموش بودن واحد است. هزینه خاموش شدن (از مدار خارج شدن) شامل هزینه سوخت بعد از خارج شدن واحد و هزینه‌های کارکنان و کارکنان هنگام توقف واحد که معمول ثابت است می‌رود.

کمینه‌سازی تابع هزینه تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و قیدهای است که در حل مسئله UC باید رعایت شود. این محدودیت‌ها شامل مواردی است که در بهره‌برداری از واحد و شبکه وجود دارند که قبلاً در بخش قبلی به برخی از آن‌ها اشاره کردیم در این‌جا بطور کاملتری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴۴]:

تأمین بار درخواستی سیستم، تأمین ذخیره گردان، محدودیت تولید واحد، حداقل زمان روشن و خاموش بودن^۸، در دسترس بودن واحد، محدودیت خدمه، محدودیت سوخت، محدودیت قابلیت اطمینان شبکه، محدودیت آلودگی محیط زیست، و سایر محدودیت‌ها که در بهره‌برداری وجود دارد [۴۴]. از آنجاکه برای حل هر مسئله بهینه‌سازی لازم است که در گام نخست آن مسئله

⁸ minimum up and down times

تعریف شود، تابع هدف و محدودیت‌های آن مشخص شود لذا در بخش بعدی مسئله UC را در حالت کلی تعریف می‌کنیم. این کار را نیز با بررسی یکی از منابعی که مطالعاتی کاملی را در این زمینه انجام داده و تقریباً نتایج مشترکی را در بین تمام منابع شامل حل مسئله UC دارد، بیان کرده‌ایم.

۶- تعریف مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها و قیود آن در حالت کلی

UC یک عمل بهینه سازی مهم است که به مقدار زیادی هزینه عملکرد روزانه سیستم‌های قدرت، را کاهش می‌دهد. هدف UC حداقل کردن هزینه بهره برداری با وجود تعداد زیادی از قیود واحدها و سیستم در مدت برنامه ریزی است.

۱-۶- تابع هدف

هزینه بهره‌برداری در مسئله UC برابر با مجموع هزینه سوخت و هزینه‌های راه اندازی و خاموش کردن واحدهای نیروگاهی با توجه به قیود متفاوت است که در یک بازه زمانی لازم است کمینه گردند. در [۲۳]، هزینه بهره برداری (Cost of operation) در مسئله UC در قالب ریاضی به صورت زیر فرمولبندی شده است:

$$C_p = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (FC_i(P_{i,h}) \times U_{i,h}) + SU_i + SD_i \quad (1)$$

که در آن FC_i هزینه سوخت واحد نیروگاهی i ام، $P_{i,h}$ توان تولیدی واحد i ام در ساعت h ام، $U_{i,h}$ وضعیت فعالیت یا عدم فعالیت واحد نیروگاهی i ام در ساعت h ام است که دارای دو حالت ۰ یا ۱ است. عدد صفر نشان دهنده خارج از مدار بودن (خاموش) و عدد یک بیانگر در مدار بودن واحد (روشن) است SU_i و SD_i به ترتیب هزینه روشن کردن و هزینه خاموش کردن ژنراتور i ام، T کل دوره برنامه ریزی و n نیز واحدهای نیروگاهی را نشان می‌دهد. هزینه سوخت هر واحد در ساعت h ام ($FC_{i,h}$) مطابق رابطه زیر به صورت تابعی سهمی از مقدار توان خروجی آن واحد بیان می‌شود:

$$FC_{i,h} = [\alpha_i P_{i,h}^2 + \beta_i P_{i,h} + \gamma_i] \cdot U_{i,h} \quad (2)$$

که در آن α_i ، β_i ، γ_i ضرایب هزینه سوخت واحد حرارتی i ام، $P_{i,h}$ نیز توان خروجی واحد در حال تولید i ام در ساعت h ام است. $U_{i,h}$ نشانگر وضعیت واحد نیروگاهی i ام در ساعت h ام است که دارای دو حالت صفر یا ۱ است. هزینه خاموش کردن مقدار بسیار کمی است و عموماً در تحقیقات انجام شده از آن صرف نظر شده است. هزینه‌های راه اندازی و خاموش کردن صرفاً هزینه‌هایی هستند که در هنگام راه اندازی و خاموش کردن وجود دارند.

بنا به نتایج [۴۲]، هزینه راه‌اندازی هر واحد نیز متناسب با تعداد ساعات خاموش بودن واحد، برابر با یکی از دو مقدار هزینه راه‌اندازی سرد یا گرم خواهد بود:

$$SU_i = \begin{cases} H_{startup}(i) & \text{if } DT(i) \leq CSH(i) \\ C_{startup}(i) & \text{if } DT(i) > CSH(i) \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $H_{startup}(i)$ ، $C_{startup}(i)$ به ترتیب هزینه راه اندازی گرم و هزینه راه اندازی سرد واحد i ام، هستند. $DT(i)$ تعداد ساعات متوالی خاموش بودن واحد i ام، $CSH(i)$ بیشینه مدت زمان خاموش بودن واحد نیروگاهی برای راه‌اندازی گرم آن واحد است.

۶-۲- قیود محدودکننده:

مجموعه قیودی که در این مسئله باید در نظر گرفته شود، به دو دسته قیود تساوی و نامساوی تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از:

۶-۲-۱- قید تعادل توان یا محدودیت تعادل بار

تضمین کننده تولید توان به میزان تقاضا است. در واقع می توان گفت که مهمترین قید در مسأله بهینه سازی UC، قید تعادل مصرف شبکه و مجموع تولید واحدها در هر ساعت است. یا به عبارتی مجموع مقادیر توان خروجی نیروگاه های هر ساعت باید با میزان تقاضای بار پیشبینی شده برای آن ساعت برابر باشد. این قید به صورت زیر بیان شده است:

$$\sum_{i=1}^n U_{i,h} \cdot P_{i,h} = P_D^h \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

که در آن P_D^h بیانگر میزان تقاضای بار در ساعت h ام، T کل دوره فعالیت است. $U_{i,h}$ حالت واحد در حال تولید i ام در ساعت h ام، $P_{i,h}$ توان خروجی واحد در حال تولید i ام در ساعت h ام و n تعداد واحدهای در حال تولید است.

۶-۲-۲- قید محدودیت توان تولیدی

محدودیت حداقل و حداکثر ظرفیت تولید به دلیل ایجاد شرایط واقعی اهمیت می یابد. به منظور کارکرد با بازدهی بالا در بلند مدت، مقدار تولید واحدهای نیروگاهی باید بین حداقل تولید و حداکثر آن قرار گیرد. یعنی مجموع تولید و ذخیره سیستم بین این دو حد باشد. محدودیت میزان تولید واحدهای تولیدی به صورت زیر بیان می شود:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i = 1 \dots n_g \quad (5)$$

در این رابطه، P_{Gi}^{\min} و P_{Gi}^{\max} حداقل و حداکثر توان خروجی (تولیدی) هر ژنراتور است.

۶-۲-۳- قید ذخیره چرخان

برنامه زمانی در مدار قرار گرفتن واحدها باید به گونه ای تنظیم شود که سیستم قدرت علاوه بر تأمین تقاضای بار پیش بینی شده هر ساعت، قابلیت تأمین مقدار توانی بیشتر از مقدار تقاضای بار را برای مواقع ضروری داشته باشد. این مقدار توان با عنوان ذخیره چرخان شناخته می شود [۴۲]. وجود ذخیره چرخان برای حفظ امنیت سیستم برای مقابله با برخی حوادث، از جمله خروج ناگهانی ژنراتور ها و یا خطوط الزامی است. ذخیره چرخان، براساس قواعد خاصی که در زیر آمده، تعیین می شود:

۱- درصدی از اوج مصرف

۲- معادل بزرگترین واحد نیروگاهی

۳- تابعی از امید از دست رفتن بار (LOLP) (یا احتمال عدم تولید کافی برای تأمین بار)

قید مربوط به ذخیره چرخان در رابطه زیر با بهره گیری از نتایج [۲۳،۳] آمده است:

$$\sum_{i=1}^n U_{i,h} \cdot P_{i,\max}^h \geq P_D^h + SR^h \quad (6)$$

که در آن SR^h میزان ذخیره چرخان در ساعت h ام است و معمولاً به اندازه ده درصد از تقاضای بار پیش بینی شده هر ساعت در نظر گرفته می شود [۴۲]:

$$SR^h = P_D^h \quad (7)$$

۶-۲-۴- قید حداقل زمان روشن و خاموش کردن

شامل قید حداقل زمان روشن ماندن و قید حداقل زمان خاموش بودن است و بیان کننده حداقل زمانی است که یک سیستم باید روشن یا خاموش باشد تا بتواند تغییر وضعیت بدهد. در واقع وقتی که یک واحد روشن می‌شود بدلیل موارد فنی باید یک حداقل زمانی را بطور مداوم در مدار باقی بماند و همینطور زمانی که از مدار خارج می‌شود نیز باید یک حداقل زمانی را خاموش بماند [۱]:

$$\begin{aligned} T_i^{ON} &\geq T_i^{up} \\ T_i^{OFF} &\geq T_i^{down} \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن T_i^{down} ، T_i^{up} ، T_i^{OFF} ، T_i^{ON} از راست به چپ به ترتیب بیانگر زمان در مدار بودن واحد در حال تولید i ام، زمان خاموش بودن واحد در حال تولید i ام، حداقل زمان روشن بودن واحد i ام، حداقل زمان خاموش بودن واحد i ام است.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، با مرور منابع مختلف، به مطالعه مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی با هدف حداقل سازی هزینه‌های بهره‌برداری پرداخته شده است. هدف از حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها، تعیین وضعیت واحدهای تولیدی موجود در یک شبکه قدرت می‌باشد. در مسئله UC علاوه بر هزینه بهره‌برداری واحدها، هزینه‌ها و قیود از قبیل: هزینه راه‌اندازی، هزینه از مدار خارج نمودن واحد، ذخیره چرخان، زمان توقف و فعالیت نیز می‌بایست که مورد توجه قرار بگیرد. برنامه زمان‌بندی به مدار آمدن نیروگاه‌ها در سیستم قدرت تعیین کننده زمان ورود و خروج و توان تولیدی همه واحدها از حالت اولیه برای برآورده کردن بار مورد تقاضای مصرف کنندگان در افق مورد مطالعه می‌باشد. در این مقاله با بررسی رفرنس‌های گوناگون، برخی از مسایل مبنا در زمینه در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها بررسی شده و روش‌های موجود در این زمینه با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. روش‌های استفاده شده برای حل مسأله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها را می‌توان به سه دسته کلاسیک، هوشمند و ترکیبی تقسیم‌بندی نمود که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند. مقایسه نتایج بدست آمده از منابع گوناگون نشان می‌دهد که تاکنون تلاش‌های محاسباتی گسترده‌ای با توجه به افزایش ابعاد سیستم‌های قدرت، در جهت حل مسئله به مدار آمدن نیروگاه‌ها صورت گرفته است. یافتن برنامه زمان‌بندی بهینه در مسئله به مدار آمدن نیروگاه‌ها می‌تواند منجر به میلیون‌ها دلار کاهش هزینه برای شرکت‌های برق گردد. لذا تلاش‌های گسترده‌ای برای یافتن راه‌حل‌های کارآمدتر و بهینه‌تر و قابل اجرا در سیستم‌های با ابعاد بزرگ در گذشته به این مسئله اختصاص یافته است. روش‌های بسیاری برای حل مسئله به مدار آمدن نیروگاه‌ها وجود دارد که می‌توان به روش لیست حق تقدم، روش برنامه‌ریزی دینامیکی، برنامه‌ریزی خطی، ساده‌سازی لاگرانژ و الگوریتم‌های تکاملی مختلف و ... اشاره کرد. برخی روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی دینامیکی روش‌های مناسبی برای حل مسئله UC می‌باشند ولی چون با افزایش ابعاد مسئله و تعداد واحدها این روش‌ها کند می‌باشند نمی‌توان در عمل که تعداد واحدها زیاد است از آن‌ها استفاده نمود. از نظر سرعت عمل و جواب مناسب روش‌های هوشمند برتری نسبی نسبت به روش‌های کلاسیک و تجربی دارند ولی بازهم با افزایش ابعاد مسئله گاهی دچار مشکل می‌شوند بنابراین به فکر ترکیب روش‌های هوشمند با یکدیگر و یا ترکیب آن‌ها با روش‌های کلاسیک و تجربی افتاده‌اند که با توجه به نتایج به دست آمده، عمده‌ای از روش‌های ترکیبی شاید وقتی تعداد واحدها کم هستند تفاوت چندانی با روش‌های هوشمند و کلاسیک نداشته باشد ولی وقتی تعداد واحدها زیاد باشد به وضوح می‌توان تفاوت در سرعت و دقت روش‌های ترکیبی را مشاهده نمود که همین امر منجر به برتری این روش‌ها شده است.

۸- مراجع

- ایمان اورک - علی سعیدیان - سید سعیداله مرتضوی - امیر سرشاد. «کاهش هزینه‌های تولید در سیستم‌های قدرت (تجدید ساختار یافته) با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، اولین کنفرانس سراسری اصلاح الگوی مصرف انرژی الکتریکی. اهواز - شبکه برق منطقه ای خوزستان. ۱۳۸۸

۲. احمد منوچهری - احد سلیمی، "در مدار قرار گرفتن واحد برق آبی برای نیروگاههای متشکل از گروه های مجزا از واحد های تولیدی توسط مدیریت ورود و خروج واحدها و پخش بار اقتصادی" دومین کنفرانس ملی تحقیقات کاربردی در مهندسی برق کامپیوتر و فناوری اطلاعات، شیراز - موسسه عالی علوم و فناوری خوارزمی، ۱۳۹۶
۳. ولی اله امانی شانديز - ارسلان نجفی - حمید فلقی، "به مدار آوردن واحدهای نیروگاههای با در نظر گرفتن آلودگیهای زیست محیطی" چهارمین کنفرانس نیروگاههای برق، تهران - انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۰
4. Amjady, N. and Shirzadi, A., "Unit commitment using a new integer coded genetic algorithm", *European Trans. On Electrical Power*, Vol. 19, No. 8, pp. 1161–1176, 2009.
5. Yuan, X., Nie, H., Su, A., Wanga, L. and Yuan, Y., "An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 4, pp. 8049–8055, 2009.
6. Yuan, X., Nie, H., Su, A., Wanga, L. and Yuan, Y., "Application of enhanced discrete differential evolution approach to unit commitment problem", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 9, pp. 2449–2456, 2009.
7. Lau, T. W., Chung, C. Y., Wong, K. P., Chung, T. S. and Ho, S. L., "Quantuminspired evolutionary algorithm approach for unit commitment", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1503–1512, 2009.
8. Eslamian, M., Hosseinian, S.H. and Vahidi, B., "Bacterial foraging based solution to the unit-commitment problem", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1478–1488, 2009.
9. Kazarlis, S. A., Bakirtzis, A. G. and Petridis, V., "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 83–92, 1996.
10. Juste, K. A., Kita, H., Tanaka, E. and Hasegawa, J., "An Evolutionary programming solution to the unit commitment problem", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1452–1459, 1999.
11. Ebrahimi, J., Hosseinian, S.H. and Gharehpetian, G.B., "Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 573–581, 2011.
12. Simopoulos, D.N., Kavatza, S.D. and Costas D. Vournas, C. D. "Unit Commitment by an Enhanced Simulated Annealing Algorithm", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 21, No.1, pp. 68–76, 2006.
13. Sum-im, T. and Ongsakul, W., "Ant colony search algorithm for unit commitment", *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 72-77, 2003.
14. Viana, A., Sausa, J. and Matos, M., "Using GRASP to solve the unit commitment problem", *Analysis of Operations Research*, Vol. 120, No 1, pp.117–132, 2003.
15. Balci, H. and Valenzuela, J., "Scheduling electric power generations using particle swarm optimization combined with the Lagrangian relaxation method", *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 411–421, 2004.
16. Senjyu, T., Miyagi, T., Saber, A.Y., Urasaki, N. and Funabashi, T., "Emerging solution of large-scale unit commitment problem by stochastic priority list", *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, No. 5, pp. 283–292, 2006.
17. Eldin, A.S., El-sayed, M. and Youssef, H., "A two-stage genetic based technique for the unit commitment optimization problem", *12th International Middle East Power System Conference, MEPCO, Aswan*, pp. 425-430, 2008.
18. Xiong, W., Li, M.J. and Cheng, Y.L., "An improved particle swarm optimization algorithm for unit commitment", *Proceedings of the 2008 international conference on intelligent computation technology and automation*, Vol. 1, pp. 21-25, 2008.
19. Jeong, Y.-W., Park, J.B., Shin, J.R. and Lee, K. Y., "A thermal unit commitment approach using an improved quantum evolutionary algorithm", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, No. 7, pp. 770–786, 2009.
20. J. F. Restrepo, F. D. Galiana, "Unit commitment with primary frequency regulation constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1836-1842, Nov. 2005.
21. Khanmohammadi, S., Amiri, M. and Haque, M. T., "A new three-stage method for solving unit commitment problem", *Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 3072-3080, 2010.
22. Patra, S., Goswami, S.K. and Goswami, B., "Fuzzy and simulated annealing based dynamic programming for the unit commitment problem", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 3, pp. 5081–5086, 2009.
۲۳. ارسلان نجفی ، محسن فرشاد ، حمید فلقی ، "به مدار آوردن نیروگاه ها با یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم تجمع زنبور عسل" ، مجله علمی - پژوهشی سیستم های هوشمند در مهندسی برق، دوره ۱ شماره ۱، صفحات ۱۱۸-۱۰۳، زمستان ۱۳۸۹.

24. T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato, and T. Funabashi, "A fast technique for unit commitment problem by extended priority list," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 882-888, 2003.
25. V.K. Tumuluru, Z. Huang, and D.H. Tsang, "Unit commitment problem: A new formulation and solution method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 222-231, 2014.
26. W.J. Hobbs, G. Hermon, S. Warner, and G. Shelbe, "An enhanced dynamic programming approach for unit commitment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1201-1205, 1988.
27. M. Carrión, and J.M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1371-1378, 2006.
28. G. Dudek, "Genetic algorithm with binary representation of generating unit start-up and shut-down times for the unit commitment problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, pp. 6080-6086, 2013.
29. S. Chakraborty, T. Ito, T. Senjyu, and A.Y. Saber, "Unit commitment strategy of thermal generators by using advanced fuzzy controlled binary particle swarm optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 1072- 1080, 2012.
30. D. Datta, and S. Dutta, "A binary-real-coded differential evolution for unit commitment problem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 517-524, 2012.
31. M. Barati, and M.M. Farsangi, "Solving unit commitment problem by a binary shuffled frog leaping algorithm," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 8, pp. 1050-1060, 2014.
32. K. Chandrasekaran, S. Hemamalini, S.P. Simon, and N.P. Padhy, "Thermal unit commitment using binary/real coded artificial bee colony algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 84, pp. 109-119, 2012.
33. K. Chandrasekaran, S.P. Simon, and N.P. Padhy, "Binary real coded firefly algorithm for solving unit commitment problem," *Information Sciences*, vol. 249, pp. 67-84, 2013.
34. T. Niknam, F. Bavafa, and R. Azizpanah-Abarghoee, "New self-adaptive bat-inspired algorithm for unit commitment problem," 2014.
35. C. Chung, H. Yu, and K.P. Wong, "An advanced quantum-inspired evolutionary algorithm for unit commitment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 847-854, 2011.
36. B. Ji, X. Yuan, Z. Chen, and H. Tian, "Improved gravitational search algorithm for unit commitment considering uncertainty of wind power," *Energy*, vol. 67, pp. 52-62, 2014.
37. B. Saravanan, E. Vasudevan, and D. Kothari, "Unit commitment problem solution using invasive weed optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 21-28, 2014.
۳۸. حسین شکری و سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحات ۴۲-۳۰، ۱۳۹۴.
39. V.N. Dieu, and W. Ongsakul, "Augmented Lagrange Hopfield network based Lagrangian relaxation for unit commitment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 522-530, 2011.
40. W. Yuan-Kang, H. Chih-Cheng, and L. Chun-Liang, "Resolution of the unit commitment problems by using the hybrid Taguchi-ant colony system algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 188-198, 2013.
41. T. Logenthiran, and W.L. Woo, "Lagrangian relaxation hybrid with evolutionary algorithm for short-term generation scheduling," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 356-364, 2015.
۴۲. سعید مرادی، سهراب خان محمدی و مهرداد طرفدارحق، «روش اکتشافی برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی بر پایه الگوریتم جستجوی خفاش»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵.
۴۳. مشهدی کشتیان، اتابک و وکیل باغمیشه، محمد تقی، سمینار کارشناسی ارشد با عنوان کاربرد های شبکه های عصبی در سیستم های قدرت، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۵.
۴۴. سعیدمرادنوری، مصطفی عیدبانی، «در مدار قرار گرفتن نیروگاه CommitmentUnit»، *موسسه آموزش عالی خراسان، آبان ۱۳۹۴*.