

برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید

با قید انعطاف‌پذیری شبکه

همایون برهمندپور - شهرام منتصر کوهساری - حسن رستگار

دانشگاه صنعتی امیرکبیر-دانشکده مهندسی برق

تهران - ایران

hberahmandpour@aut.ac.ir, smontom@aut.ac.ir, rastegar@aut.ac.ir

بهره‌برداری بهینه سیستم‌های قدرت در بازه‌های زمانی زمان واقعی^۱ و برنامه‌ریزی بهره‌برداری^۲، برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید^۳ است که در آن برنامه ورود و خروج واحدها در بازه‌های زمانی بهره‌برداری شبکه به همراه میزان اقتصادی تولید هر واحد مشخص می‌گردد. تابع هدف کلی این بهینه‌سازی، هزینه اقتصادی تولید است که در آن بخش‌های مختلف هزینه‌های نظیر هزینه سوخت واحدهای حرارتی، هزینه روشن شدن و یا خاموش شدن واحدها و نیز هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از آلودگی واحدهای حرارتی حضور دارند. از سوی دیگر، محدودیت‌های حاکم بر این بهینه‌سازی بطور اعم شامل محدودیت‌های حداقل و حداکثر تولید هر واحد، نرخ افزایش یا کاهش تولید هر واحد^۴، حداقل زمان روشن بودن و یا خاموش بودن هر واحد پس از هر تغییر وضعیت و نیز محدودیت‌های ناشی از انتقال توان در شبکه می‌باشد. حل مسئله برنامه‌ریزی با محدودیت اخیر^۵ به نام برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید با قید امنیت شبکه^۶ خوانده می‌شود.

لکن در سال‌های اخیر مفهوم جدیدی تحت عنوان "انعطاف‌پذیری"^۶ در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت معرفی و بکار گرفته شده است که

چکیده — انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مفهوم نسبتاً جدیدی است که با افزایش ضریب نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه و به دنبال آن افزایش عدم قطعیت و تغییرپذیری در تولید، نقش ویژه‌ای در مطالعات سیستم قدرت در هر دو شاخه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری یافته است. انعطاف‌پذیری، شاخص‌های ارزیابی گوناگونی دارد که یکی از آنها معیار نرخ افزایش/کاهش تولید واحدهای تولیدی جهت غلبه بر تغییرپذیری‌های موجود در تولید منابع تجدیدپذیر است. این معیار در بازه مطالعاتی بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهره‌برداری بسیار کاربرد دارد. در این مقاله با بررسی انعطاف‌پذیری و شاخص مناسب آن برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه، رویه تحلیلی برنامه‌ریزی ورود و خروج واحدهای تولید با در نظر گرفتن شاخص انعطاف‌پذیری ارائه می‌گردد و با اجرای الگوریتم تحلیلی، نقش انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری بهینه تولید و آرایش مناسب واحدهای تولید برای برآوردن معیار انعطاف‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی- انعطاف‌پذیری؛ شاخص ارزیابی؛ برنامه‌ریزی

بهره‌برداری؛ برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید

^۱ Real Time

^۲ Operational Planning

^۳ Unit Commitment (UC)

^۴ UP/Down Ramp Rate

^۵ Security Constrained Unit Commitment (SCUC)

^۶ Flexibility

۱. مقدمه

بهره‌برداری بهینه سیستم قدرت، یکی از مهمترین و پرچالش‌ترین جنبه‌های عملکردی سیستم‌های قدرت امروزی است. اصلی‌ترین ابزار محاسباتی

بکارگیری قیود انعطاف‌پذیری مناسب، روشها و رویکردهای جدیدی را ارائه داده‌اند. [۵ و ۴] در این مقاله با مرور مدلسازی برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید، نحوه تغییر شکل این مدل جهت در نظر گرفتن قیود انعطاف‌پذیری ارائه شده و با ذکر یک مثال کاربردی، نتایج برنامه‌ریزی تولید تحت سناریوهای مختلف بررسی می‌گردد.

۲. بررسی انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی بهینه

ورود و خروج واحدهای تولید

یکی از شاخص‌های معتبری که برای محاسبه انعطاف‌پذیری هر یک از واحدهای تولید در شبکه قدرت به منظور تبیین قابلیت سیستم قدرت در مقابله با عدم قطعیت تولید و بار در بهره‌برداری شبکه معرفی شده، در رابطه (۱) آمده است. [۱]

$$Flex(i) = \frac{1/2[P_{max}(i) - P_{min}(i)] + 1/2[Ramp(i) \Delta t]}{P_{max}(i)} \quad (1)$$

در این رابطه، $Flex(i)$ شاخص انعطاف‌پذیری واحد i ام و $P_{min}(i)$ ، $P_{max}(i)$ و $Ramp(i)$ به ترتیب بیشینه و کمینه تولید و میانگین نرخ افزایش/کاهش تولید این واحد و Δt زمان پاسخگویی به تغییرات مورد نیاز در تولید است. واضح است که این شاخص بدون بعد می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود، در این شاخص دو معیار "بازه بین حداقل و حداکثر تولید واحد" و "متوسط نرخ افزایش یا کاهش تولید" به عنوان قابلیت واحد تولیدی در پاسخگویی به عدم قطعیت و تغییرپذیری تولید در نظر گرفته شده که هر دو با ضریب وزنی یکسان (۰/۵) در ایجاد شاخص انعطاف‌پذیری سهم‌اند. البته می‌توان ضریب وزنی این دو مولفه را متفاوت در نظر گرفت و برای بخش نرخ افزایش/کاهش توان، ضریب بالاتری تخصیص داد تا بدین شکل سرعت تغییرپذیری توان واحد تولیدی موثرتر باشد. همچنین قرار گرفتن ظرفیت واحد در مخرج رابطه، به منظور یک‌سازی این شاخص است.

حال با توجه به تعریف (۱)، می‌توان شاخص انعطاف‌پذیری کل سیستم قدرت را به شکل رابطه (۲) تعریف کرد. [۱]

$$FLEX = \sum_{i \in A} \left[\frac{P_{max}(i)}{\sum_{i \in A} P_{max}(i)} Flex(i) \right] \quad (2)$$

A ، مجموعه واحدهای تولیدی است که در تعیین شاخص انعطاف‌پذیری سیستم نقش دارند. به عبارت دیگر شاخص انعطاف‌پذیری سیستم، مجموع وزنی از انعطاف‌پذیری واحدهای مختلف است که ضریب وزنی هر واحد، سهم مشارکت آن در ایجاد ظرفیت تولید کل سیستم می‌باشد. این شاخص

خصوصاً در بخش بهره‌برداری، برنامه‌ریزی آرایش بهینه واحدهای تولید را تحت تاثیر قرار داده است. برای این مفهوم، می‌توان تعریف کلی زیر را ارائه کرد.

انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت، قابلیت آن در مقابله با تغییرپذیری^۷ ذاتی و عدم قطعیت^۸ موجود در هر دو بخش تولید و تقاضا است به شکلی که بتواند مصالحه مناسبی از قابلیت اطمینان و هزینه را بطور توأم فراهم آورد. [۲ و ۱]

همچنین انعطاف‌پذیری در [۳] چنین تعریف شده است.

انعطاف‌پذیری، توانایی سیستم قدرت در ایجاد توازن سریع تولید و مصرف در پاسخ به تغییرات تولید منابع تجدیدپذیر و نیز خطای پیش‌بینی در تولید آنها است.

همانگونه که دیده می‌شود، در هر دو تعریف، دو خصلت عدم قطعیت و تغییرپذیری منابع تولید تجدیدپذیر، دو مفهوم پایه‌ای برای انعطاف‌پذیری است. بنابراین مفهوم انعطاف‌پذیری و اهمیت آن در شبکه قدرت از زمانی در این شبکه گسترش یافت که از یک سو تعداد بازیگران و به تبع آن عدم قطعیت به واسطه رفتار غیرقابل پیش‌بینی آنها افزایش یافت و از سوی دیگر منابع تولید با عدم قطعیت و تغییرپذیری بالا که همان منابع تولید تجدیدپذیر می‌باشند، به شکل انبوه بکار گرفته شد. در خصوص دسته دوم که مورد بحث این مقاله است، دو چالش جدی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه ایجاد شد که اولی عدم قطعیت و خطا در پیش‌بینی توان قابل استحصال از منابع تجدیدپذیر و دومی تغییرپذیری مداوم و پیوسته تولید انرژی از این منابع است که مقابله با هر دوی آنها نیاز به ویژگی پاسخگویی سریع به نوسانات تولید دارد. این ویژگی نمودی از انعطاف‌پذیری سیستم قدرت است. یکی از ابزارهای ایجاد انعطاف‌پذیری برای مقابله با این چالش‌ها، در اختیار داشتن قدرت مانور کافی برای تغییرات سریع تولید است که با پارامتر نرخ افزایش/کاهش توان تولیدی واحدها شناخته می‌شود. بنابراین در بخش برنامه‌ریزی بهره‌برداری با قید انعطاف‌پذیری، یکی از راهکارهای فراهم آوردن انعطاف‌پذیری مناسب برای شبکه، برنامه‌ریزی و بکارگیری واحدهایی است که در عین حال مجموع نرخ افزایش یا کاهش توان در آنها، از حد از پیش تعیین شده‌ای که انعطاف‌پذیری لازم را برای شبکه فراهم می‌آورد، بیشتر باشد.

این تحلیل موضوع تحقیقات فراوانی بوده که در هر دو سمت توسعه الگوریتم‌های مناسب برای برنامه‌ریزی بهینه تولید با قید انعطاف‌پذیری و نیز

^۷ Variability

^۸ Uncertainty

محدودیت‌های این تابع هدف را می‌توان در دسته روابط (۶) مشاهده کرد.

الف - محدودیت توازن تولید و مصرف

$$\sum_{i=1}^{N_G} P(i, t) I(i, t) = P_D(t) \quad t = 1, \dots, N_t \quad (1-6)$$

P_D مقدار تقاضای بار در هر بازه زمانی است.

ب - محدودیت رزرو گردان

$$\sum_{i=1}^{N_G} r_s(i, t) I(i, t) \geq R_s(t) \quad t = 1, \dots, N_t \quad (2-6)$$

R_s و r_s به ترتیب میزان رزرو گردان هر واحد در هر بازه زمانی و میزان

رزرو گردان لازم در همان بازه است.

ج - محدودیت رزرو عملیاتی

$$\sum_{i=1}^{N_G} r_o(i, t) I(i, t) \geq R_o(t) \quad t = 1, \dots, N_t \quad (3-6)$$

R_o و r_o به ترتیب میزان رزرو عملیاتی هر واحد در هر بازه زمانی و میزان

رزرو عملیاتی لازم در همان بازه است.

د - محدودیت‌های حداقل و حداکثر تولید هر واحد

$$P_g^{\min}(i) I(i, t) \leq P(i, t) I(i, t) \leq P_g^{\max}(i) I(i, t) \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, N_t \quad (4-6)$$

P_g^{\max} و P_g^{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر توان قابل تولید هر واحد است.

ه - محدودیت‌های حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد

$$[X^{on}(i, t-1) - T^{on}(i)] [I(i, t-1) - I(i, t)] \geq 0 \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, N_t \quad (5-6)$$

$$[X^{off}(i, t-1) - T^{off}(i)] [I(i, t-1) - I(i, t)] \geq 0 \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, N_t \quad (6-6)$$

X^{off} و X^{on} مدت زمان روشن بودن و خاموش بودن هر واحد و T^{off} و T^{on}

حداقل زمان روشن بودن یا خاموش بودن واحد است.

ز - قیود نرخ افزایش/کاهش توان واحد

$$P(i, t) - P(i, t-1) \leq [1 - I(i, t)(1 - I(i, t-1))] UR(i) + I(i, t)[1 - I(i, t-1)] P_g^{\min}(i) \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, N_t \quad (7-6)$$

$$P(i, t) - P(i, t-1) \leq [1 - I(i, t-1)(1 - I(i, t))] DR(i) + I(i, t-1)[1 - I(i, t)] P_g^{\max}(i) \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, N_t \quad (8-6)$$

UR و DR به ترتیب نرخ افزایش تولید و نرخ کاهش تولید هر واحد است.

حال به مجموعه قیود فوق، قیود انعطاف‌پذیری شبکه افزوده می‌شود. این

کار به دو شکل قابل انجام است. یا آنکه برای هر بازه زمانی برنامه‌ریزی، دو

شاخص مجموع نرخ افزایش/کاهش تولید واحدها مطابق دو رابطه (۳) و

(۴)، بزرگتر از مقدار از پیش‌تعیین شده‌ای باشند. این عملکرد مشابه

محدودیت رزرو در هر یک از حالات رزرو گردان یا رزرو عملیاتی است.

طریق دیگر آن است که در هر بازه زمانی برنامه‌ریزی، شاخص

انعطاف‌پذیری شبکه مطابق رابطه (۲) ساخته شده و با در نظر گرفتن مقدار از

پیش‌تعیین شده برای حد مجاز این شاخص، محدودیت انعطاف‌پذیری در

مدلسازی وارد شود. در این مقاله، از رویه اول برای مدلسازی انعطاف‌پذیری

در منابع به عنوان "شاخص انعطاف‌پذیری یک‌شده" (NFI⁹) شناخته می‌شود. این شاخص به طور گسترده‌ای در ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت در آرایش‌های مختلف واحدهای تولید برای بهره‌برداری بهینه استفاده می‌شود.

در [۴] شاخص انعطاف‌پذیری برای تعیین آرایش بهینه واحدهای تولید، مقدار مطلوب و از پیش تعیین شده مجموع نرخ افزایش/کاهش تولید واحدهای شبکه است:

$$\sum_{i=1}^{N_g} R_i^U(x_i) \leq R_i^U \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} R_i^D(x_i) \leq R_i^D \quad (4)$$

در دو رابطه (۳) و (۴)، نمادهای R ، i ، x و t به ترتیب نرخ تغییر تولید،

وضعیت واحد i در بازه زمانی t و U و D نیز به ترتیب شاخص افزایش یا

کاهش می‌باشند. بدین ترتیب علاوه بر ارضاء محدودیت‌های تکی نرخ

افزایش/کاهش تولید هر یک از واحدها بر اساس مشخصه واحد، دو

شاخص مجموع نرخ افزایش/کاهش تولید واحدها نیز نباید از مقدار از

پیش‌تعیین شده‌ای کوچکتر گردند. مشخصاً هر چه سهم واحدهای با قابلیت

مناسب در افزایش یا کاهش تولید کمتر گردد و به جای آن واحدهای با

عدم قطعیت و تغییرپذیری بالا (نظیر واحدهای بادی) جایگزین شود،

شاخص انعطاف‌پذیری کم شده و اگر به جایی برسد که حداقل‌های دو

شاخص (۳) و (۴) برآورده نگردد، نتیجتاً حضور واحدهای انعطاف‌پذیر

علی‌رغم هزینه بالای آنها نسبت به واحدهای تجدیدپذیر برای برآوردن

انعطاف‌پذیری مطلوب در شبکه، لازم می‌گردد.

۳. مدلسازی برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج

واحدهای تولید با قید انعطاف‌پذیری

قالب کلی تابع هدف برای مدلسازی برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج

واحدهای تولید را می‌توان به شکل رابطه (۵) نوشت: [۵]

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_g} [C_i(P(i, t)I(i, t) + SU(i, t) + SD(i, t)) \quad (5)$$

در این رابطه، C ، P ، I ، SU و SD به ترتیب هزینه، وضعیت، هزینه

راه‌اندازی و هزینه خاموش شدن هر واحد i در بازه زمانی t می‌باشد. N_t و

N_g نیز به ترتیب تعداد بازه‌های زمانی و تعداد ژنراتورهای تولیدی است.

گاهی به این تابع هدف، هزینه‌های ناشی از آلودگی زیست‌محیطی نیز افزوده

می‌گردد.

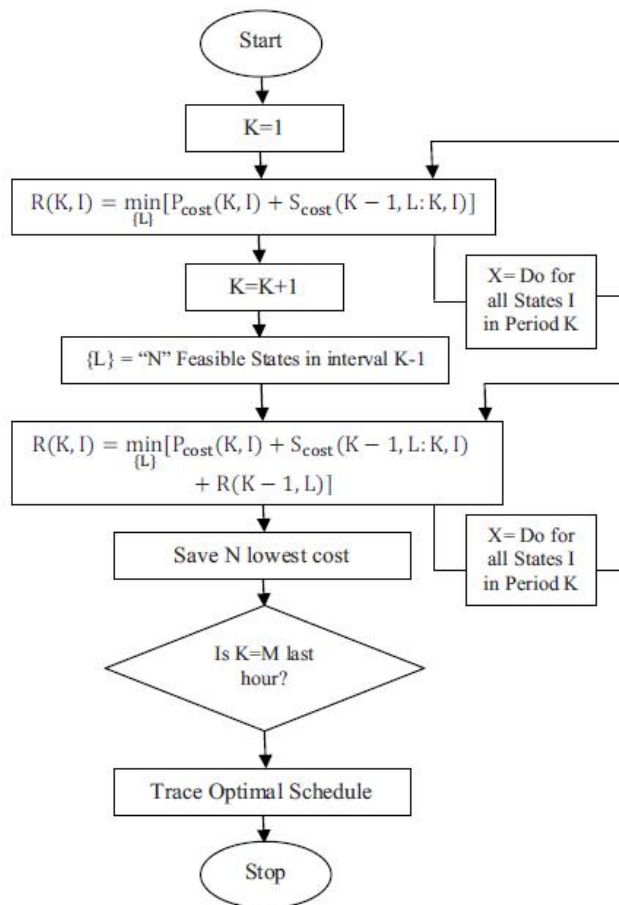
⁹ Normalized Flexibility Index (NFI)

استفاده شده است. بنابراین دو قید اضافی برای برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری، روابط (۳) و (۴) خواهند بود که به مجموعه محدودیت‌های دسته روابط (۶) اضافه می‌شوند.

۴. تحلیل برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج

واحدهای تولید با قید انعطاف‌پذیری

برای حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید، روشهای متعددی وجود دارد. در اینجا بدون آنکه به تشریح جزئیات حل مسئله برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط بکار گرفته شده برای این بهینه‌سازی پرداخته شود، تنها به روش برنامه‌ریزی پویا^{۱۱} برای حل این مسئله که در مراجع مختلف معرفی و تشریح شده است، آن هم تنها با ارائه روندنمای الگوریتم مربوطه، اشاره می‌شود. شکل (۱)، روندنمای الگوریتم کلی برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید را بر اساس روش برنامه‌ریزی پویا نشان می‌دهد [۶].



شکل ۱: روندنمای برنامه‌ریزی ورود و خروج بهینه واحدهای تولید

کلیه متغیرهای ذکر شده در این روندنما، در مرجع مذکور معرفی شده که در اینجا به منظور رعایت اختصار، از ذکر آنها خودداری می‌گردد. همانگونه که ذکر شد، برای در نظر گرفتن محدودیت‌های ناشی از انعطاف‌پذیری شبکه، لازم است قیود مربوطه به مدل اضافه شوند. در مورد اینکه چه میزان انعطاف‌پذیری برای شرایط گوناگون بهره‌برداری مورد نیاز است، نیاز به تدوین رویه‌ای است که بتواند شاخص انعطاف‌پذیری را همسنگ با سایر پارامترها و محدودیت‌های بهینه‌سازی در مدل وارد کند.

مخصوصاً هر چه انعطاف‌پذیری بیشتری مورد نیاز باشد، بکارگیری واحدهایی که می‌توانند این سرویس را در بهره‌برداری ایجاد نمایند، واجب‌تر شده و از آنجا که این واحدها بطور ذاتی دارای هزینه تولید بالاتری هستند، خود به خود هزینه بهره‌برداری از شبکه بالا می‌رود. همانگونه که ذکر شد، این خود نیازمند تدوین رویه‌ای است که در آن مصالحه‌ای بین هزینه بهره‌برداری شبکه و انعطاف‌پذیری مطلوب صورت گیرد. مشابه این رویه در مطالعات قابلیت اطمینان نیز وجود دارد. جایی که میزان مناسب قابلیت اطمینان شبکه

^{۱۱} Dynamic Programming (DP)

همانگونه که دیده می‌شود، دو شاخص مربوط به مجموع افزایش/کاهش نرخ تولید واحدهای شبکه در هر بازه زمانی جهت ارزیابی میزان انعطاف‌پذیری سیستم قدرت بر اساس معیارهای روابط (۳) و (۴) نشان داده شده است. مشخصاً در دو بازه زمانی (۵) و (۶) به دلیل حضور تنها یک واحد در مدار، مقدار این دو شاخص به حداقل مقدار خود می‌رسد. هرچند در این دو بازه میزان بار کم بوده و تولید واحد مربوطه کفایت می‌کند، لکن به دلیل انعطاف‌پذیری پایین تولید در این دو بازه، ضربه‌پذیری سیستم در مقابل عدم قطعیت‌ها و تغییرپذیری‌های تولید بسیار بالا است.

جدول ۱: نتایج بهره‌برداری بهینه تولید بدون قیود انعطاف‌پذیری

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
تولید (MW)	۴۵۰	۶۳۰	۶۰۰	۴۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۳۰۰	۳۲۰
هزینه کل (£)	۱۵۱۵	۲۶۳۵	۱۹۸۳	۱۳۵۶	۶۲۰	۴۴۱	۱۴۴۳	۹۱۴
وضعیت واحدها	۰۱۱۰	۱۱۱۱	۱۱۱۰	۱۱۱۰	۰۱۰۰	۰۱۰۰	۱۱۰۱	۱۱۰۰
مجموع نرخ افزایش تولید (MW/h)	۱۸۰	۳۱۰	۳۳۰	۲۳۰	۸۰	۸۰	۲۱۰	۱۳۰
مجموع نرخ کاهش تولید (MW/h)	۲۷۰	۴۶۵	۳۴۵	۳۴۵	۱۲۰	۱۲۰	۳۱۵	۱۹۵

حال فرض شود هر یک از شاخص‌های پیش‌گفته (روابط (۳) و (۴))، دارای حداقل‌های مجاز از پیش تعیین شده باشند. در اینجا فرض می‌شود مقدار مجاز هر یک از این دو شاخص، برابر 100 MW/h باشد. بر این اساس در بازه‌های زمانی (۵) و (۶)، مقدار این شاخص برای نرخ افزایش تولید، کمتر از حد مجاز است. بنابراین با اجرای مجدد الگوریتم برنامه‌ریزی بهینه تولید با قید محدودیت پیش‌گفته، برنامه‌ریزی جدید آرایش واحدهای تولید بدست می‌آید. جدول (۲) نتیجه تحلیل در این حالت را نشان می‌دهد.

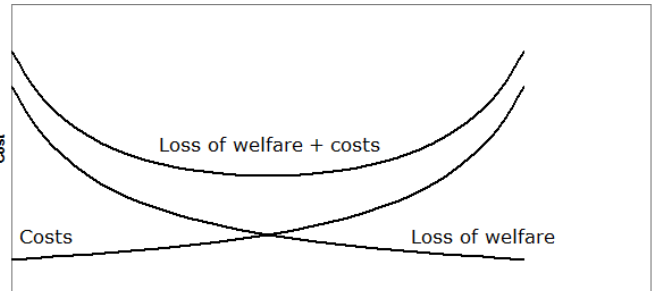
جدول ۲: نتایج بهره‌برداری بهینه تولید همراه قیود انعطاف‌پذیری

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
تولید (MW)	۴۵۰	۶۳۰	۶۰۰	۴۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۳۰۰	۳۲۰
هزینه کل (£)	۱۵۱۵	۲۶۳۵	۱۹۸۳	۱۳۵۶	۶۸۸	۵۰۶	۱۱۶۰	۱۱۱۷
وضعیت واحدها	۰۱۱۰	۱۱۱۱	۱۱۱۰	۱۱۱۰	۱۰۱۰	۱۰۱۰	۱۰۱۱	۱۰۱۰
مجموع نرخ افزایش تولید (MW/h)	۱۸۰	۳۱۰	۳۳۰	۲۳۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰
مجموع نرخ کاهش تولید (MW/h)	۲۷۰	۴۶۵	۳۴۵	۳۴۵	۲۲۵	۲۲۵	۳۴۵	۲۲۵

هزینه کل تولید در این حالت برابر $£ 10961$ است.

همانگونه که دیده می‌شود، نرخ افزایش تولید در دو بازه (۵) و (۶) بیش از حداقل مجاز است. واضح است که در این حالت به دلیل تحمیل قیود انعطاف‌پذیری به شبکه، آرایش واحدها در دو بازه زمانی (۵) و (۶) و پس

با مصالحه بین هزینه خاموشی و هزینه بهبود قابلیت اطمینان بدست می‌آید. در خصوص انعطاف‌پذیری هم همین منطبق صادق است. نمودار شکل (۲)، شمایی از این مصالحه را به شکل کلی نشان می‌دهد. [۲] آنچه که در نمودار تحت عنوان "رفاه"^{۱۱} مشخص شده، می‌تواند هر دو جنبه قابلیت اطمینان و یا انعطاف‌پذیری را در بر گیرد. در خصوص هزینه از دست دادن قابلیت اطمینان (کاهش رفاه)، معادل آن به عنوان هزینه خاموشی مطرح می‌گردد.



شکل ۲: مصالحه بین هزینه اقتصادی و رفاه

در خصوص هزینه از دست دادن انعطاف‌پذیری نیز می‌توان گفت از آنجا که عامل اصلی ایجاد ناپیوستگی و تغییرپذیری تولید، نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشند، بنابراین با کاهش انعطاف‌پذیری شبکه، آنچه که معادل هزینه عدم کفایت انعطاف‌پذیری در نظر گرفته می‌شود، هزینه معادل انقطاع نیروگاه‌های تجدیدپذیر^{۱۲} است. بنابراین بدین شکل می‌توان معادل اقتصادی انعطاف‌پذیری را نیز بدست آورد که البته موضوع این مقاله نمی‌باشد.

۵. شبیه‌سازی عددی

برای بررسی روند برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید با قید انعطاف‌پذیری شبکه تحت سناریوهای مختلف، از اطلاعات مثال تحلیلی که در [۷] ارائه شده است استفاده می‌گردد. اطلاعات واحدهای حرارتی مذکور در این مثال، در پیوست آمده است.

ابتدا حالت بدون در نظر گرفتن قیود انعطاف‌پذیری (روابط (۳) و (۴)) مورد نظر قرار می‌گیرد. جدول (۱) نتیجه برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید را در این حالت نشان می‌دهد.

در سطر وضعیت واحدها، دو کد صفر و یک به ترتیب معرف عدم حضور و حضور واحدهای یک تا چهار به ترتیب از سمت چپ می‌باشد. هزینه کل تولید در این حالت برابر $£ 10907$ است.

^{۱۱} Welfare

^{۱۲} Renewable Power Curtailment

- [3] – Bertsch J, Growitsch C, Lorenczik S, Nagl S., "Flexibility Options in European Electricity Markets in High RES-E Scenarios", Köln; 2012
- [4] - Shuai Lu, Yuri V. Makarov, Yunhua Zhu, Ning Lu, Nirupama Prakash Kumar, Bhujanga B. Chakrabarti, "Unit Commitment Considering Generation Flexibility and Environmental Constraints", IEEE, Power and Energy Society General Meeting, 2010
- [5] – Bo Lu, M Shahidehpour, "Unit Commitment with Flexible Generation Units", IEEE Transaction on Power System, Vol 20, No 2, May 2005
- [6] – P. K. Singhal, R. N. Sharma, "Dynamic Programming Approach for Large Scale Unit Commitment Problem", International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2011
- [7] – "Power Generation, Operation and Control", By Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, and Gerald B. Sheblé, Third Edition, John Wiley and Sons, 2014

از آن تغییر کرده و نتیجتاً هزینه کل تولید افزایش یافته است. این افزایش هزینه، به خاطر افزایش میزان انعطاف‌پذیری شبکه تا رسیدن به حد مطلوب و مورد انتظار است که به خاطر آن از بازه زمانی (۵)، یک واحد تولید دیگر اضافه‌تر از آنچه که در حالت معمول مورد نیاز بوده، وارد مدار شده است. در صورتی که اگر محدودیت برآوردن شاخص انعطاف‌پذیری مطلوب، مورد نظر نبود، نیازی هم به ورود این واحد نبود.

به هر حال همانگونه که گفته شد، اینکه مقدار مناسب و مطلوب انعطاف‌پذیری چه میزان است، خود موضوع تحقیق مجزایی است. برای تعیین میزان مطلوب انعطاف‌پذیری سیستم قدرت در مقابل افزایش هزینه‌های بهره‌برداری، نیاز به مصالحه اقتصادی و انجام رویه‌ای است که بر اساس آن با استخراج دو منحنی هزینه تولید و هزینه انعطاف‌پذیری بر اساس نمودار شکل (۲) و تعیین مجموع آنها، منحنی هزینه کل برآورد شده و نقطه بهینه این منحنی به عنوان نقطه مطلوب مصالحه اقتصادی بین هزینه بهره‌برداری و هزینه انعطاف‌پذیری قلمداد گردد.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با ورود منابع انرژی تجدیدپذیر در حجم انبوه، در کنار تمام مزایا و منافع که بر آنها مترتب است، یکی از اصلی‌ترین چالش‌های شبکه قدرت در بهره‌برداری، کاهش انعطاف‌پذیری به دلیل ورود نایقینی‌ها و تغییرپذیری‌های بزرگ ناشی از این منابع تولید است. به منظور مقابله با این چالش، لازم است مطالعات انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری صورت گرفته و در کنار برنامه‌ریزی بهینه تولید، شاخص میزان مطلوب انعطاف‌پذیری سیستم قدرت رعایت گردد. در این مقاله با مرور مدلسازی برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید، قید انعطاف‌پذیری تولید توسط یکی از شاخص‌های معتبر در این زمینه، در این مدلسازی وارد گردید و با انجام تحلیل بر روی اطلاعات نمونه‌ای، نقش افزایش انعطاف‌پذیری شبکه در برنامه‌ریزی بهینه مشاهده شد. برای دستیابی به نقطه بهینه کلی، لازم است معادل هزینه عدم کفایت انعطاف‌پذیری نیز مدلسازی شده و سپس به تابع هدف اضافه گردد. بدین‌شکل با بهینه‌سازی تابع ترکیبی هزینه تولید و هزینه عدم کفایت انعطاف‌پذیری، می‌توان انتظار داشت که مصالحه مناسبی بین این دو هزینه انجام شده و نقطه بهینه کلی، بهترین نقطه بهره‌برداری شبکه است.

۷. مراجع

- [1] – Juan Ma, Vera Silva, Régine Belhomme, Daniel S. Kirschen, Luis F. Ochoa, "Exploring the Use of Flexibility Indices in Low Carbon Power Systems", Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2012
- [2] – "Flexibility in the Power System - Danish and European experiences", Danish Energy Agency, 2015

۸. پیوست - اطلاعات تحلیل

این اطلاعات از [V] برداشت شده و با تغییرات کمی به منظور اخذ نتایج ملموس‌تر، در دو جدول زیر آورده شده است.

الف - اطلاعات واحدهای تولید

شماره واحد	۱	۲	۳	۴
(MW) تولید حداقل واحد	۲۵	۶۰	۷۵	۲۰
(MW) تولید حداکثر واحد	۸۰	۲۵۰	۳۰۰	۶۰
نرخ حرارتی (BTU/kWh)	۱۰۴۴۰	۹۰۰۰	۸۷۳۰	۱۱۹۰۰
هزینه بی‌باری (£)	۲۱۳	۵۸۵/۶۲	۶۸۴/۷۴	۲۵۲
هزینه راه‌اندازی سرد (£)	۳۵۰	۴۰۰	۱۱۰۰	۰/۰۲
زمان راه‌اندازی سرد (h)	۴	۵	۵	۰
هزینه راه‌اندازی گرم (£)	۱۵۰	۱۷۰	۵۰۰	۰
هزینه خاموش شدن (£)	۰	۰	۰	۰
هزینه سوخت (£/MBTU)	۲	۲	۲	۲
حداقل زمان روشن بودن (h)	۴	۵	۵	۱
حداقل زمان خاموش بودن (h)	۲	۳	۴	۱
زمان بودن در وضعیت حاضر ^o (h)	-۶	۶	۶	-۶
نرخ افزایش توان (MW/h)	۵۰	۸۰	۱۰۰	۸۰
نرخ کاهش توان (MW/h)	۷۵	۱۲۰	۱۵۰	۱۲۰
ضریب ^o a (£)	۱۰۰	۲۲۰	۱۵۰	۲۱۰
ضریب ^o b (£/MW)	۱/۱	۱/۶	۲/۵	۲/۰
ضریب ^o c (£/MW ²)	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۵

(*) علامت منفی نشان‌دهنده خاموش بودن واحد است.

(**) اطلاعات این سه پارامتر مربوط به تحلیل این مقاله است.

ب - اطلاعات بار^{*}:

بازه زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
بار (MW)	۴۵۰	۶۳۰	۶۰۰	۴۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۳۰۰	۳۲۰

(*) اطلاعات این جدول نسبت به اطلاعات داده شده در [V] تغییراتی کرده است.