

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

الزامات انعطاف‌پذیری شبکه برق برای پذیرش نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس بزرگ

همایون برهمندپور*، امید شاه‌حسینی*

پژوهشگاه نیرو

مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

*کارگروه مطالعاتی C1.39 سیگره ایران

hberahmandpour@nri.ac.ir, oshahhoseini@nri.ac.ir

چکیده

با توجه به برنامه‌ریزی‌های کلان صنعت برق کشور برای افزایش قابل ملاحظه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق و همچنین مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مترتب بر بکارگیری این انرژی‌ها، میل و رغبت سرمایه‌گذاران برای احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در ایران فزونی یافته است. در این بین باید چالش‌های مهم بکارگیری این نیروگاهها در حجم بالا را مدنظر داشت تا بهره‌برداری از شبکه در آینده با ورود حجم انبوه این نیروگاهها میسر باشد. یکی از این چالش‌ها که مربوط به ذات بکارگیری منابع باد و خورشید جهت تولید برق است، عدم قطعیت و تغییرپذیری بالای توان الکتریکی خروجی از این منابع است که لازم می‌دارد تمهیدات لازم در سیستم تولید برق کشور برای مقابله با این دو ویژگی ذاتی به قدر کفایت فراهم باشد. در این مقاله با تاکید بر قابلیت انعطاف‌پذیری سیستم تولید برای غلبه بر ویژگی ذاتی تغییرپذیری خروجی نیروگاه‌های خورشیدی و تبیین شاخص‌های عددی برای ارزیابی این قابلیت سیستم تولید، برنامه‌ریزی تولید در بازه زمانی برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه تشریح شده و با ارائه مثال عددی، نقش نیروگاه خورشیدی در کاهش هزینه بهره‌برداری از یک سو و تحمیل محدودیت‌های ناشی از تغییرپذیری تولید خورشیدی از سوی دیگر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. انتظار می‌رود در کنار توسعه فناوری منابع تجدیدپذیر و بالاخص منابع خورشیدی در شبکه برق، مطالعات لازم برای پذیرش این منابع جدید که خود دارای رفتاری متمایز با منابع تولید پیشین هستند، انجام پذیرد و راهکارهای مناسب برای چالش‌های محتمل برای ورود این منابع در بازه‌های زمانی مختلف از برنامه‌ریزی توسعه شبکه تا بهره‌برداری زمان واقعی حاصل شود.

کلید واژه

نیروگاه خورشیدی - انعطاف‌پذیری - شاخص ارزیابی - منحنی اردک - برنامه‌ریزی بهره‌برداری - نرخ افزایش/کاهش توان

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

مقدمه

خاطر انتظار می‌رود ضریب نفوذ این نیروگاه‌ها در کشور ظرف چند سال آینده با رشد قابل ملاحظه‌ای همراه باشد.

دیدگاهی که تاکنون در خصوص منابع تولید تجدیدپذیر وجود داشته، بکارگیری این منابع به شکل تولیدات پراکنده و در حد نیروگاه‌های کوچک مقیاس بوده که بدین شکل تاثیر چندانی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه برق ندارد. اما باید در نظر داشت که در صورت عدم ایجاد بسترهای لازم برای پذیرش حجم نسبتاً زیاد انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق و آن هم در سطح شبکه انتقال، قطعاً چالش‌های فراوانی متوجه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه با حضور این منابع می‌گردد. این چالش‌ها در طی دو دهه اخیر در کشورهایی که هم‌اینک حجم بالایی از تولیدات تجدیدپذیر را در شبکه دارند، تجربه و راهکارهای غلبه بر آن اندیشیده شده است. بنابراین لازم است در کشور ما نیز از هم‌اکنون با شناخت درست این چالش‌ها، راهکارهای مناسب برای آنها اندیشیده و رویه‌ها و ساز و کارهای مطلوب برای آنها فراهم شود.

در مجموع دو منبع عمده برای تولید انرژی الکتریکی، باد و خورشید می‌باشند که هر دو از پتانسیل بسیار خوبی برای تولید برق در ایران برخوردارند. مطالعات لازم در خصوص برنامه‌ریزی تولید توام با نیروگاه‌های تجدیدپذیر و نیز انتقال حجم بالای توان تجدیدپذیر به مناطق مصرف، دو نیاز جدی شبکه برق ایران در سال‌های آتی است که لزوم برنامه‌ریزی جدی در این خصوص در سطح صنعت برق کشور را می‌طلبد.

در این مقاله با بررسی خصوصیات ذاتی نیروگاه‌های خورشیدی و همچنین قابلیت سیستم قدرت برای پذیرش این نیروگاه‌ها، بررسی روند محاسباتی لازم برای تعیین ضریب نفوذ متناسب با قابلیت سیستم تولید در هر آرایش برای پاسخگویی به الزامات این نوع نیروگاه‌ها ارائه می‌شود.

۱. خصوصیات ذاتی نیروگاه‌های خورشیدی

عدم قطعیت و تغییرپذیری دو خصلت توان خروجی نیروگاه‌های خورشیدی است که موجب بروز چالش‌هایی در برنامه‌ریزی تولید در هر دو بازه بلندمدت (برنامه‌ریزی توسعه) و کوتاه‌مدت (برنامه‌ریزی بهره‌برداری) می‌گردد. همچنین برخلاف نیروگاه‌های متعارف که دارای ضریب بهره‌برداری نسبتاً بالایی هستند، ضریب بهره‌برداری

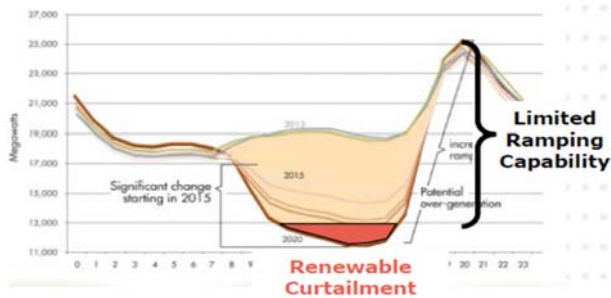
استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر خصوصاً دو شکل انرژی خورشیدی و بادی و آن هم در مقیاس وسیع مانند مزارع خورشیدی و بادی، از اهم سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان صنعت برق است. کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌گی کمتر محیط‌زیست هم‌اینک نه انتخاب بلکه اجبار برای تولید انرژی الکتریکی است. توسعه بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، از سیاست‌های راهبردی جهان در قرن بیست و یکم است. از تازه‌ترین رویدادها و سیاست‌گذاری‌ها در خصوص کاهش گازهای گلخانه‌ای و استفاده کمتر از سوخت‌های فسیلی در دنیا، نتایج کنفرانس پاریس است که در اواخر آذرماه سال ۱۳۹۴ برگزار گردید. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پایین آوردن میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی در کانون مذاکرات این کنفرانس قرار داشته است. بر اساس این توافق، افزایش گرمایش زمین تا سال ۲۰۵۰ باید زیر ۲ درجه باقی بماند. این نخستین بار در تاریخ است که همه کشورها موظف به کاهش تولید گازهای کربنی می‌شوند. همه کشورها متعهد به اجرای بخشی از این توافق خواهند بود و بخشی از آن را نیز می‌توانند داوطلبانه اجرا کنند.

متعاقب برگزاری کنفرانس صدرالذکر و براساس مصوبه هیأت‌وزیران دولت جمهوری اسلامی ایران، کاهش چهار درصدی تولید گازهای گلخانه‌ای برای ایران تا سال ۲۰۳۰ تصویب شده است. همچنین علاوه بر آن، مصوب شده در صورت برداشتن و لغو همه تحریم‌ها علیه ایران، این کشور به صورت داوطلبانه برای کاهش هشت درصد دیگر از تولید گازهای گلخانه‌ای اقدام کند. اما این به شرطی است که جامعه جهانی کمک‌های بین‌المللی و فنی مورد نیاز را، مشابه کمک‌هایی که برای دیگر کشورها هم ارائه می‌شود به ایران نماید. در این صورت ایران کاهش گازهای گلخانه‌ای تا دوازده درصد را تعهد خواهد داد.

با توجه به پتانسیل‌های بسیار مطلوب انرژی‌های خورشیدی و بادی در کشور و اقدامات انجام شده برای ورود و یا توسعه درون‌زای فناوری‌های مرتبط با این دو انرژی، نیروگاه‌های تولید برق از این منابع، در حال توسعه و پیشرفت است و با برنامه‌ریزی‌های انجام شده، ایجاد مزارع خورشیدی و بادی در سطح وسیعی در حال تحقق می‌باشد. به همین

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

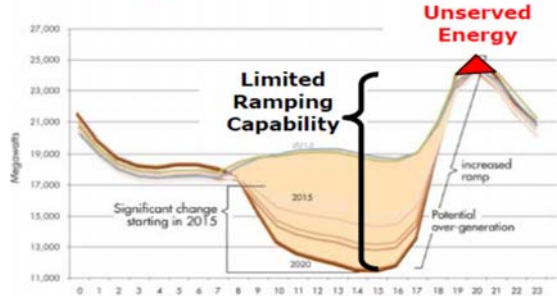
Strategy to Minimize Upward Violations



شکل (۲): الزام کمینه تولید در ساعات میانی روز

از سوی دیگر در ساعات پایانی روز و در هنگام غروب آفتاب، از یک سو میزان تابش به شدت کاهش یافته و از سوی دیگر میزان بار ناخالص شبکه افزایش می‌یابد که هر دو باعث می‌شود بار خالص با نرخ بالایی افزایش یابد. در اینجا نیز هر دو الزام نرخ افزایش تولید مورد نیاز و مجموع بیشینه قابل بهره‌برداری واحدهای تولید در مدار باید فراهم شده تا نیاز بار برآورده گردد. در غیر این صورت باعث ایجاد انرژی تغذیه نشده می‌گردد. (شکل (۳))

Strategy to Minimize Downward Violations

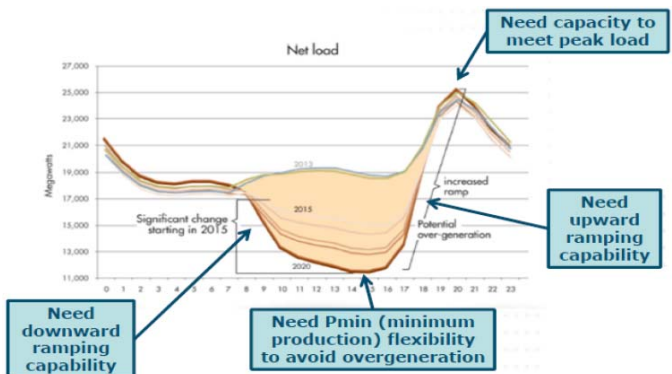


شکل (۳): الزام بیشینه تولید در ساعات پایانی روز

البته هر چه ضریب نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی بیشتر شود، چالش موسوم به اثر اردک بیشتر شده و در مقابل، در ضرایب نفوذ پایین، این چالش به مراتب کمتر است. به هر حال برای ایران که درصد افزایش استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی است، باید چالش‌های گوناگون برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه با ضرایب نفوذ مختلف را شناخته و برای آن راهکارهای مناسب اتخاذ نماید.

نیروگاه‌های خورشیدی نسبتاً کم است. به همین خاطر است که ارزیابی مشارکت نیروگاه‌های خورشیدی در تولید شبکه، بیش از آنکه در توان تولیدی شبکه انجام شود، در انرژی تولیدی شبکه می‌باشد و یکی از معتبرترین تعاریف ضریب نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی، بر اساس سهم انرژی تولیدی سالانه این نیروگاه‌ها در انرژی کل تولیدی شبکه است.

شکل (۱) در خصوص رفتار بار خالص شبکه‌های با ضریب نفوذ نسبتاً بالای نیروگاه‌های خورشیدی است که یکی از شناخته‌شده‌ترین آثار ورود این نیروگاه‌ها خورشیدی در مقیاس بالا را نشان می‌دهد که اصطلاحاً به نام منحنی اثر اردک^۱ مشهور است. بار خالص مجموع جبری بار و تولید خورشیدی است که باید توسط تولید نیروگاه‌های متعارف برآورده شود. [۱]



شکل (۱): تغییرات بار خالص روزانه

همانگونه که ملاحظه می‌شود در بخش‌های مختلف منحنی بار خالص روزانه، الزامات مختلفی برای برآورده شدن توسط سیستم تولید وجود دارد که تمهیدات ویژه‌ای را در بخش تولید می‌طلبد. در ساعات ابتدایی روز که با طلوع خورشید و شدت گرفتن تابش بار خالص به سرعت کاهش می‌یابد، لازم است علاوه بر مهیا بودن نرخ کاهش بار مناسب در واحدهای تولید در مدار شبکه، مجموع کمینه تولید قابل بهره‌برداری از واحدهای تولید از کمینه بار خالص کمتر نشود. در غیر این صورت و به ناچار برای برقراری توازن تولید و مصرف لازم است از توان تولیدی خورشیدی کاسته شود که مقبول نیست. (شکل (۲))

^۱ Duck Effect

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

۲. معرفی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت

همانگونه که گفته شد، دو شاخص مهم توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی، عدم‌قطعیت و تغییرپذیری آنها است. انعطاف‌پذیری شبکه قدرت^۲ قابلیت سیستم قدرت در مقابله با این دو چالش است. این موضوع در دو دهه اخیر، به یکی از مهمترین مطالعات برای پذیرش ورود این نوع نیروگاه‌ها از سوی شبکه تبدیل شده است. دلیل آن هم ورود حجم بالایی از این منابع تولید با عدم‌قطعیت و تغییرپذیری بالا در شبکه‌های برق می‌باشد.

برای انعطاف‌پذیری سیستم قدرت تعاریف مختلفی ارائه شده، لکن تمامی آنها منشأ و مبدأ یکسانی دارند. یکی از مناسب‌ترین تعریف‌ها که در اکثر منابع و مراجع بدان اشاره شده، بدین صورت است:

انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت، قابلیت آن در مقابله با تغییرپذیری ذاتی و عدم قطعیت 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. [۳ و ۲]

همچنین انعطاف‌پذیری در [۴] 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 عدم‌قطعیت و تغییرپذیری منابع تولید تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی)، دو مفهوم پایه‌ای انعطاف‌پذیری است.

به تعبیر دیگر می‌توان انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را توانایی و قابلیت آن در نگهداشت مداوم سرویس‌دهی در مواجهه با تغییرات سریع و بزرگ در تولید یا مصرف دانست. در گذشته و بطور سنتی، انعطاف‌پذیری سیستم قدرت تماماً توسط کنترل در سمت تولید فراهم می‌گردید. این موضوع بدین خاطر بود که اکثر قریب به اتفاق منابع تولید، از قابلیت کنترل و برنامه‌ریزی^۳ مطلوبی برخوردار بوده و علاوه بر آن، بارهای الکتریکی نیز رفتار ساده و با

دقت خوبی، قابل پیش‌بینی داشتند. لکن در دهه‌های اخیر و با افزایش سهم منابع تولید تجدیدپذیر متغیر از یک سو و رفتار متفاوت بارهای الکتریکی در شبکه به عنوان یکی از بازیگران مهم بازار از سوی دیگر، انعطاف‌پذیری‌های بیشتری علاوه بر منابع تولید کنترل‌پذیر لازم است تا به کمک آن بتوان قابلیت اطمینان مورد نیاز را برای محدوده‌های وسیعی از تولید و تقاضا که در آینده هم بسیار بیشتر از محدوده‌های فعلی خواهد بود، حاصل نمود. هر چه ضریب نفوذ و حجم منابع تولید تجدیدپذیر متغیر در شبکه بیشتر شود، به دلیل خصوصیت ذاتی تصادفی و اتفاقی بودن تولید این منابع و تغییرپذیری آنها، قابلیت انعطاف شبکه کاهش می‌یابد و بنابراین نیاز به ابزارهای اضافی برای ایجاد میزان کافی انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت می‌باشد. اصطلاح "شکاف انعطاف‌پذیری"^۴ به ویژگی کاهش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت با ورود سهم بالای منابع تجدیدپذیر متغیر اشاره دارد که لازم است با ابزارهای مناسب برای افزایش انعطاف‌پذیری، پوشش داده شود. [۵]

اصلی‌ترین مفهوم انعطاف‌پذیری، داشتن پتانسیل و قابلیت لازم در سیستم قدرت برای مقابله با عدم‌قطعیت‌ها است. شاید به همین خاطر باشد که اغلب مفهوم انعطاف‌پذیری به اشتباه با مفهوم "ذخیره سیستم قدرت"^۵، یکسان گرفته می‌شود. ذخیره سیستم قدرت اصولاً به آن بخش از آمادگی تولید گفته می‌شود که به منظور جبران عدم قطعیت در توازن تولید و مصرف و حفظ تعادل این دو بکار گرفته می‌شود. عدم تعادل تولید و مصرف می‌تواند به دلیل اختلال بزرگ در منابع تولید یا مصرف، تغییرات احتمالی و تصادفی این دو، خطای موجود در پیش‌بینی تغییرات بار و غیره پدید آید. لکن همانگونه که گفته شد، علاوه بر ویژگی عدم‌قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر، خصلت تغییرپذیری نیز از ویژگی‌های بارز این منابع است. به همین دلیل لازم است تعریفی کلی‌تر و جامع‌تر برای بیان این دو ویژگی ایجاد شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت ذخیره سیستم قدرت یکی از ابزارهای ایجاد انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت است و نه تمام آن.

⁴ Flexibility Gap

⁵ Power System Reserve

²Power System Flexibility

³ Dispatchable

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

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

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

در این رابطه، A مجموعه واحدهای تولیدی است که در تعیین شاخص انعطاف‌پذیری سیستم نقش دارند. به عبارت دیگر 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 در مقالات به عنوان "شاخص انعطاف‌پذیری یکه‌شده" (NFI^*) شناخته می‌شود.

همانگونه که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، شاخص انعطاف‌پذیری هر واحد تولیدی، از دو جزء با سهم مشارکت یکسان تشکیل شده است. بخش اول بازه تغییرات توان در محدوده کمینه تا بیشینه واحد تولیدی را نشان می‌دهد که مربوط به قابلیت غلبه بر عدم قطعیت است. بخش دوم نیز مبین نرخ افزایش/کاهش توان تولیدی است که مرتبط با قابلیت غلبه بر تغییرپذیری است. به کمک رابطه (۲) می‌توان شاخص انعطاف‌پذیری سیستم تولید را در هر آرایش تولید محاسبه نمود و سپس با انجام مطالعات اقتصادی، آرایشی را انتخاب نمود که ضریب نفوذ مورد نیاز برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر را پاسخگو باشد و یا بالعکس اگر میزان انعطاف‌پذیری، عدد مشخصی است، سطحی از ضریب نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر را که متناسب با شاخص انعطاف‌پذیری است، اجازه ورود داد.

عدم قطعیت تولید نیروگاه‌های خورشیدی در مقایسه با تولید نیروگاه‌های بادی بسیار کمتر است و آنچه که بیشتر در مورد نیروگاه‌های خورشیدی اهمیت دارد، نرخ افزایش/کاهش توان تولیدی مورد نیاز برای غلبه بر تغییرپذیری تولید این نیروگاه‌ها است. یکی از شاخص‌های مهم که در زمینه ارزیابی تغییرپذیری تولید نیروگاه‌های خورشیدی استفاده می‌شود، شاخص نرخ تغییرات تولید تجمعی روزانه^۶ است. [۶]

۳. شاخص ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت

انعطاف‌پذیری سیستم قدرت از دو طریق انعطاف‌پذیری در سیستم تولید و در بار (مدیریت بار) حاصل می‌گردد. باید توجه داشت که ایجاد انعطاف‌پذیری لازم برای غلبه بر عدم قطعیت و تغییرپذیری در هر دو سمت تولید و بار مستلزم صرف هزینه است. بنابراین یکی از هزینه‌هایی که بطور غیرمستقیم در تولید حجم بالای منابع متغیر به شبکه تحمیل می‌شود، هزینه ایجاد انعطاف‌پذیری است. لکن دقیقاً مشابه شاخص قابلیت اطمینان شبکه، میزانی از انعطاف‌پذیری که برای پاسخگویی سیستم قدرت به عدم قطعیت و تغییرپذیری لازم است، از مصالحه اقتصادی بین منفعت تولید برق از منابع ارزان قیمت تجدیدپذیر و هزینه ایجاد انعطاف‌پذیری برای پذیرش منابع تجدیدپذیر بدست می‌آید. به همین خاطر مشابه مفهوم قابلیت اطمینان، لازم است شاخص‌هایی برای انعطاف‌پذیری معرفی و ارزیابی اقتصادی آنها انجام گیرد تا بدین‌وسیله بتوان مصالحه اقتصادی مورد نظر را به انجام رساند.

انعطاف‌پذیری سیستم تولید معمولاً از دو بخش ظرفیت تولید لازم برای مقابله با عدم قطعیت و نرخ افزایش/کاهش کافی برای توان تولیدی برای مقابله با تغییرپذیری حاصل می‌شود. از این رو عموماً شاخص‌هایی بر پایه این دو خصوصیت برای واحدهای تولید معرفی شده و سپس با ترکیب آنها، شاخص انعطاف‌پذیری کل سیستم تولید بدست می‌آید.

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. [۲]

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

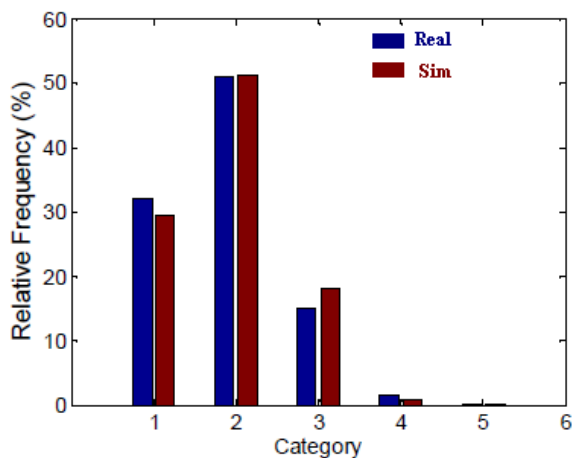
در این رابطه، $Flex(i)$ شاخص انعطاف‌پذیری واحد i و $P_{\max}(i)$ ، $P_{\min}(i)$ و $Ramp(i)$ به ترتیب بیشینه و کمینه تولید و میانگین نرخ افزایش/کاهش تولید این واحد و Δt زمان پاسخگویی به تغییرات مورد نیاز در تولید است. واضح است که این شاخص بدون بعد می‌باشد.

⁶ Normalized Flexibility Index (NFI)

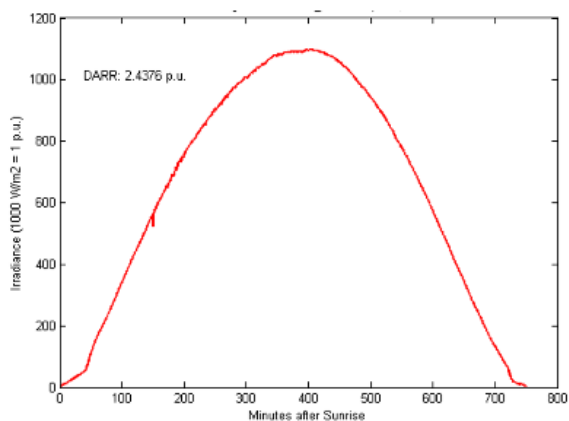
⁷ Daily Aggregate Ramp Rate (DARR)

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

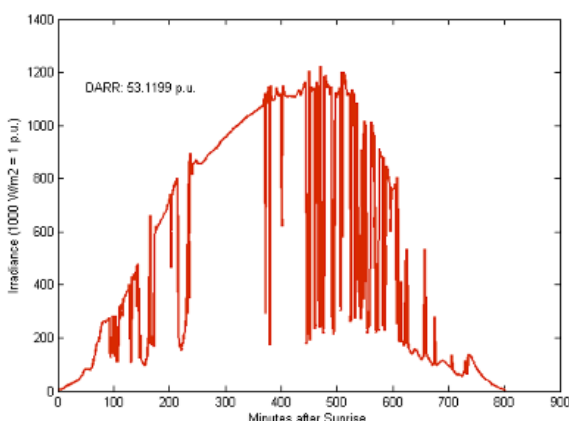
مشاهده گردد. هر دو مورد مربوط به یک واحد ۲۱ مگاواتی و در دو روز متفاوت در ماه آوریل می‌باشد. [۷]



شکل (۴): هیستوگرام سالانه دسته‌بندی DARR



شکل (۵): تغییرات آرام تولید (DARR=2.1)



شکل (۶): تغییرات شدید تولید (DARR=53.1)

قطعاً هزینه تولید واحدهای متعارف در آرایش تولید متناظر با روز دارای DARR بزرگتر، بیشتر از هزینه روز با DARR کوچکتر است.

این شاخص مطابق رابطه (۳) معرفی می‌شود.

$$DARR = \frac{\sum_{t=1}^{1440} |x(t) - x(t-1)|}{X^*} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $x(t)$ مقدار متوسط در بازه دقیقه t ام برای شدت تابش بر سطح (W/m^2) (و یا میزان تولید) و X^* مقدار نامی آن است. این مجموع برای ۱۴۴۰ دقیقه هر شبانه‌روز محاسبه می‌شود و به همین دلیل عنوان شاخص تجمعی روزانه را دارد. همچنین در این شاخص افزایش و کاهش توان تولیدی، یکسان در نظر گرفته می‌شود.

برای حالت هوای کاملاً صاف و آفتابی با کمترین تغییرات در شدت تابش و بیشینه تابش برابر تقریباً $1000 W/m^2$ در ظهر، کمینه مقدار DARR تقریباً برابر ۲ بدست می‌آید. لکن در روزهایی که شدت تابش با تغییرات زیادی همراه است، مقدار آن در محدوده ۷۰ تا ۸۰ تغییر می‌کند. در [۶] بر اساس مقادیر مختلف DARR، دسته‌بندی‌های گوناگونی برای روزهای گوناگون سال انجام شده است. در این مرجع، پنج دسته‌بندی مجزا برای روزهای گوناگون سال تشخیص داده شده که در زیر آورده شده است.

الف - دسته اول: $DARR < 3$

ب - دسته دوم: $3 \leq DARR < 13$

ج - دسته سوم: $13 \leq DARR < 23$

د - دسته چهارم: $23 \leq DARR < 33$

ه - دسته پنجم: $33 \leq DARR$

شکل (۴) هیستوگرام فراوانی این پنج دسته را برای روزهای سال برای یک نمونه از نیروگاه خورشیدی با شش واحد تولیدی و برای دو حالت اطلاعات واقعی و داده‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مشخص است که دسته دوم، بیشترین فراوانی را دارد و پس از آن به ترتیب دسته اول و سوم قرار دارند. سه دسته باقیمانده، سهم چندانی در فراوانی سالانه ندارند.

در دو شکل (۵) و (۶) دو نمونه از تغییرات شامل تغییرات روزانه آرام شدت تابش (دسته‌بندی اول) و تغییرات روزانه شدید شدت تابش (دسته‌بندی پنجم)، نشان داده شده است. تفاوت معنی‌دار شاخص DARR در این دو نمونه

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

۴. ارزیابی ضریب نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی

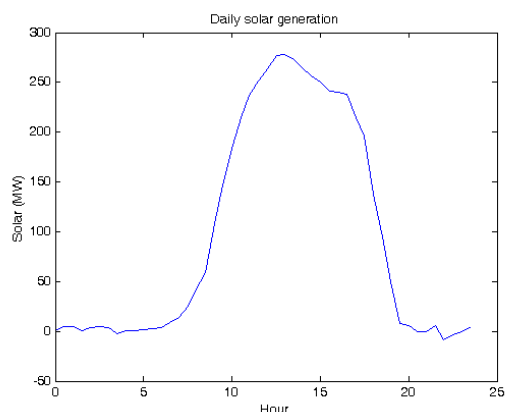
یکی از مهمترین مطالعات در هر دو بخش برنامه‌ریزی و بهره‌برداری در سیستم تولید برق، میزان مناسب ضریب نفوذ نیروگاه خورشیدی با فرض مقدار مشخص انعطاف‌پذیری در سیستم تولید می‌باشد. هر چند از سوی دیگر می‌توان میزان ضریب نفوذ را ثابت فرض کرد و بر اساس آن شاخص انعطاف‌پذیری را برای پذیرش میزان قابل انتظار ضریب نفوذ تعیین نمود. در حالت دوم، لازم است در صورت نیاز تمهیداتی در سیستم تولید اندیشیده شود تا شاخص انعطاف‌پذیری به حد لازم برای پذیرش ضریب نفوذ مطلوب ارتقاء یابد که این خود هزینه اضافی را به سیستم تولید تحمیل می‌کند. در واقع می‌توان با مصالحه اقتصادی بین منفعت ناشی از تولید انرژی ارزان توسط واحدهای خورشیدی و هزینه لازم برای ایجاد انعطاف‌پذیری برای غلبه بر عدم قطعیت آن، به حد مناسب و اقتصادی ضریب نفوذ دسترسی یافت.

در بازه بهره‌برداری از سیستم قدرت، مهمترین ابزار مطالعاتی برای ارزیابی نقش نیروگاه‌های خورشیدی در برنامه‌ریزی تولید و یا تعیین میزان مطلوب ضریب نفوذ برای این نیروگاه‌ها، برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج واحدهای تولید (UC^A) می‌باشد. در این مسیر لازم است هر دو بخش عدم قطعیت و تغییرپذیری نیروگاه‌های خورشیدی به شکل مناسبی مدل‌سازی شده و سپس در مدل برنامه‌ریزی بهینه تولید وارد شوند. شکل دیگر تعیین نقش و اثر نیروگاه‌های خورشیدی، به کمک شاخص انعطاف‌پذیری است که با تعیین مقدار مناسب شاخص انعطاف‌پذیری برای پذیرش میزان مطلوب ضریب نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی، آرایشی از تولید حاصل می‌گردد که ضمن برآوردن قید کمینه سطح انعطاف‌پذیری لازم، کمینه هزینه را نیز در پی داشته باشد. به عبارت دیگر، در این حالت، قید کمینه انعطاف‌پذیری، در کنار سایر قیود برنامه‌ریزی بهینه تولید قرار می‌گیرد.

۵. شبیه‌سازی و تحلیل نقش نیروگاه‌های

خورشیدی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از تولید

به منظور شبیه‌سازی و تحلیل نقش نیروگاه‌های خورشیدی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری^۹ تولید، از یک مثال عددی استفاده می‌شود. در این مثال، یک سیستم تولید با چهار واحد تولید حرارتی با حداکثر ظرفیت تولید ۶۹۰ مگاوات فرض می‌شود. اطلاعات این سیستم تولید از [۸] برداشت شده که این اطلاعات به همراه اطلاعات بار در پیوست آمده است. در ادامه منحنی تولید روزانه یک نیروگاه خورشیدی با ظرفیت ۳۰۰ مگاوات در نظر گرفته می‌شود. شکل (۷)، منحنی تولید روزانه این نیروگاه را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تولید روزانه نیروگاه خورشیدی (MW)

همچنین شکل (۸) منحنی تغییرات بار روزانه (منحنی سبز رنگ) و منحنی بار خالص روزانه (منحنی آبی رنگ) را نشان می‌دهد.

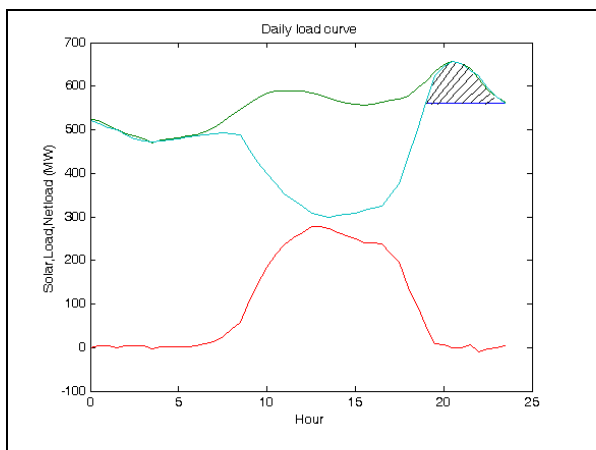
تحلیل مورد نظر در دو بخش انجام می‌گیرد. ابتدا برنامه‌ریزی تولید بدون حضور نیروگاه خورشیدی ارائه می‌شود تا بدین شکل مقدار پایه هزینه بهره‌برداری شبکه حاصل گردد. سپس در ادامه برنامه‌ریزی تولید با حضور نیروگاه خورشیدی انجام می‌شود تا نقش این نیروگاه در کاهش هزینه بهره‌برداری از یک سو و ایجاد محدودیت‌های تولید از سوی دیگر مشخص گردد.

⁹ Operational Planning

⁸ Unit Commitment

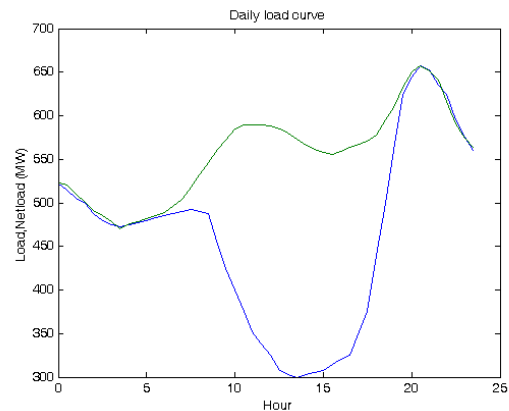
دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

این بار نرخ افزایش/کاهش توان تمام واحدهای تولید در نسبت ۰/۸ ضرب می‌گردد. مشخصاً در این حالت شاخص انعطاف‌پذیری سیستم تولید کاهش خواهد یافت (رابطه (۱)). در این حالت به دلیل نرخ افزایش شدید بار ناخالص در ساعات انتهایی روز و کمبود نرخ افزایش توان واحدهای تولید، جواب قابل قبول حاصل نمی‌گردد و بنابراین در این حالت مسئله جواب ندارد. این چالش مشابه آن چیزی است که در شکل (۳) نشان داده شده است و علی‌رغم آنکه ظرفیت تولید قابلیت پاسخگویی به اوج مصرف را دارد، لکن به دلیل تغییرات سریع بار خالص در ساعات انتهایی روز، امکان تعقیب بار با نرخ افزایش توان واحدها وجود ندارد که ناگزیر منجر به عدم تعقیب بار در نزدیکی اوج مصرف شده و خاموشی حاصل می‌گردد. در واقع برای اخذ پاسخ برنامه‌ریزی تولید در این حالت، لازم است در ساعات اوج مصرف خاموشی اعمال گردد. با تعیین مقدار کمینه خاموشی برای اخذ پاسخ قابل قبول در این حالت، لازم است از ساعت ۱۹:۳۰ لغایت ۲۳:۳۰، منحنی تغییرات بار خالص ثابت شود تا امکان پاسخگویی قابلیت تولید واحدها به تغییرات بار فراهم گردد. شکل (۹) نتیجه این تحلیل را نشان می‌دهد.



شکل (۹): تغییرات بار، بار خالص و تولید خورشیدی روزانه (MW)

در شکل (۹)، منحنی سبز رنگ تغییرات بار روزانه، منحنی قرمز رنگ تغییرات تولید روزانه نیروگاه خورشیدی و منحنی آبی رنگ تغییرات بار خالص است. سطح هاشورخورده، بخشی از بار را نشان می‌دهد که به دلیل محدودیت ناشی از کمبود انعطاف‌پذیری در شبکه، تغذیه نشده و منجر بر بروز خاموشی شده است. همانگونه که ذکر شد به دلیل تغییرات افزایشی شدید بار خالص در ساعات



شکل (۸): تغییرات بار و بار خالص روزانه (MW)

الف - بهره‌برداری بدون حضور نیروگاه خورشیدی

با انجام تحلیل برنامه بهینه ورود و خروج واحدهای تولید (UC)، هزینه کلی برابر ۴۴۵۷۷ پوند بدست می‌آید. آرایش بهینه و تولید هر واحد تولیدی در این حالت، در پیوست آمده است.

ب - بهره‌برداری در حضور نیروگاه خورشیدی و اطلاعات مبنا

به منظور نشان دادن قابلیت سیستم تولید جهت غلبه بر تغییرپذیری نیروگاه خورشیدی، این تحلیل در دو بخش انجام می‌گیرد. در بخش اول اطلاعات سیستم تولید، اطلاعات مبنا است و بر این اساس برنامه‌ریزی با ورود نیروگاه خورشیدی انجام می‌شود. مشخصاً در این حالت لازم است به جای منحنی بار مورد تقاضا، منحنی بار خالص (بار منهای تولید نیروگاه خورشیدی) مد نظر قرار گیرد. در اینجا نیز با انجام تحلیل برنامه بهینه ورود و خروج واحدهای تولید (UC)، هزینه کلی برابر ۳۷۱۴۶ پوند بدست می‌آید. آرایش بهینه و تولید هر واحد تولیدی در این حالت، در پیوست آمده است. با در نظر گرفتن رابطه (۵) برای تعیین ضریب نفوذ نیروگاه خورشیدی، مقدار ضریب نفوذ نیروگاه برابر ۱۷/۲۸٪ بدست می‌آید.

$$PF (\%) = \frac{\text{Wind Energy (GWh)}}{\text{Total Electricity Demand (GWh)}} * 100 \quad (5)$$

ج - بهره‌برداری در حضور نیروگاه خورشیدی و کاهش انعطاف‌پذیری

برای تعیین نقش نیروگاه خورشیدی و قابلیت انعطاف‌پذیری سیستم تولید برای پذیرش تغییرپذیری آن،

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

۷. مراجع

- [1] – P. Denholm, M. O'Connell, G. Brinkman, J. Jorgenson, "Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart", NREL, 2015
- [2] – 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
- [3] – "Flexibility in the Power System - Danish and European experiences", Danish Energy Agency, 2015
- [4] – Bertsch J, Growitsch C, Lorenczik S, Nagl S., "Flexibility Options in European Electricity Markets in High RES-E Scenarios", Köln; 2012
- [5] – Georgios Papaefthymiou, Katharina Grave, Ken Dragoon, "Flexibility Options in Electricity Systems", Project number: POWDE14426, Ecofys, 2014
- [6] – R.V.Haaren, M. Morjaria, V. Fthenakis, "Empirical Assessment of Short-term Variability from Utility-scale Solar PV Plants", Progress in photovoltaics: Research and application, John Wiley & Sons Publication, 2012
- [7] – de la Parra, Iñigo. (2015). "Grid integration of large-scale PV plants", PhD Thesis University of Pamplona, Spain
- [8] - A. J. Wood and B. F. Wollenberg: "Power Generation Operation and Control", 1984, John Wiley, New York

پایانی روز، قابلیت پاسخگویی به این تغییرات در سیستم تولید موجود نیست و ناگزیر از ساعت ۱۹:۳۰ لغایت ۲۳:۳۰ بار ناخالص ثابت بوده و در این فاصله زمانی اوج مصرف بار تامین نمی‌گردد. این به خاطر کمبود نرخ افزایش توان در این بازه در تحلیل انجام شده می‌باشد. بنابراین در صورتیکه سیستم تولید با چنین چالشی روبرو گردد، لازم است آرایشی از واحدها انتخاب شود که علی‌رغم هزینه تولید بالاتر، بتواند نیاز نرخ افزایش تولید را در این ساعات برآورده سازد.

در حالت اخیر هزینه تولید ۳۶۰۱۷ پوند و ضریب نفوذ نیروگاه خورشیدی به میزان ۲۱/۴۱٪ است. هر دو مقدار حاصله غیر قابل استناد می‌باشند. از آنجا که اوج بار به میزان ۴ ساعت برآورده نشده است، بنابراین میزان هزینه تولید واقعی نیست. افزایش میزان ضریب نفوذ هم به همان دلیل عدم برآوردن نیاز مصرف در ساعات اوج (تولید کمتر واحدهای شبکه) و بالطبع افزایش سهم مشارکت تولید خورشیدی است. نتیجه این تحلیل نیز در پیوست آمده است.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی در کنار تمام مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مترتب بر آن، با چالش‌هایی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه برق روبرو است. یکی از این چالش‌ها، ذات عدم قطعیت و تغییرپذیری موجود در توان الکتریکی خروجی نیروگاه‌های خورشیدی است که قابلیت انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را برای مقابله با این چالش الزام می‌دارد. با توجه به تغییرات روزانه انرژی الکتریکی استحصال از این منابع و نیز عدم قطعیت میزان تولید به دلیل تغییرات غیرقابل پیش‌بینی شدت تابش، لازم است تمهیدات ویژه برای این دو ویژگی نیروگاه‌های خورشیدی اندیشیده شود. به هر حال علی‌رغم کاهش هزینه‌های تولید در شبکه‌های با ضریب نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر به دلیل استحصال انرژی از این منابع، لکن هزینه‌های دیگری برای ایجاد میزان مطلوب انعطاف‌پذیری بر شبکه تحمیل می‌گردد که لازم است با انجام مطالعات لازم و مدل‌سازی دقیق رفتار نیروگاه‌های خورشیدی، کمینه هزینه ناشی از بهره‌برداری شبکه با وجود این نیروگاه‌ها حاصل گردد.

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

پیوست

نتایج تحلیل‌ها

اطلاعات سیستم تولید

الف - تولید واحدها بدون حضور نیروگاه خورشیدی

(MW)

واحد چهارم	واحد سوم	واحد دوم	واحد اول	ساعت
۰	۱۸۹/۹	۲۵۰	۸۰	۱
۰	۱۷۰/۴	۲۵۰	۸۰	۲
۰	۱۵۴/۸	۲۵۰	۸۰	۳
۰	۱۴۰/۵	۲۵۰	۸۰	۴
۰	۱۴۸/۳	۲۵۰	۸۰	۵
۰	۱۵۵/۴	۲۵۰	۸۰	۶
۰	۱۶۶/۵	۲۵۰	۸۰	۷
۰	۱۸۸/۱	۲۵۰	۸۰	۸
۰	۲۱۶/۵	۲۵۰	۸۰	۹
۰	۲۴۲/۵	۲۵۰	۸۰	۱۰
۰	۲۵۹/۳	۲۵۰	۸۰	۱۱
۰	۲۵۸/۹	۲۵۰	۸۰	۱۲
۰	۲۵۴/۵	۲۵۰	۸۰	۱۳
۰	۲۴۳/۲	۲۵۰	۸۰	۱۴
۰	۲۳۱/۹	۲۵۰	۸۰	۱۵
۰	۲۲۵/۹	۲۵۰	۸۰	۱۶
۰	۲۳۳/۴	۲۵۰	۸۰	۱۷
۰	۲۴۱/۰	۲۵۰	۸۰	۱۸
۰	۲۶۵/۱	۲۵۰	۸۰	۱۹
۶۰	۲۴۳/۱	۲۵۰	۸۰	۲۰
۶۰	۲۶۷/۵	۲۵۰	۸۰	۲۱
۶۰	۲۵۰/۹	۲۵۰	۸۰	۲۲
۰	۲۶۱/۲	۲۵۰	۸۰	۲۳
۰	۲۳۳/۶	۲۵۰	۸۰	۲۴

شماره واحد	۱	۲	۳	۴
P _{min} (MW)	۲۵	۶۰	۷۵	۲۰
P _{max} (MW)	۸۰	۲۵۰	۳۰۰	۶۰
Inc.heat_rate (BTU/kWh)	۱۰۴۴۰	۹۰۰۰	۸۷۳۰	۱۱۹۰۰
No_load_cost (£/h)	۲۱۳/۰۰	۵۸۵/۶۲	۶۸۴/۷۴	۲۵۲/۰۰
Start_cost_cold (£)	۳۵۰	۴۰۰	۱۱۰۰	۰/۰۲
Fuel_cost (£/MBTU)	۲/۰۰	۲/۰۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰
Min_up_time (h)	۴	۵	۵	۱
Min_down_time (h)	۲	۳	۴	۱
In.status (h)	-۶	-۶	+۶	+۶
Start_cost_hot (£)	۱۵۰	۱۷۰	۵۰۰	۰
Cold_start (h)	۴	۵	۵	۰
Ramp-up (MW/h)	۵۰	۸۰	۱۰۰	۸۰
Ramp-down (MW/h)	۷۵	۱۲۰	۱۵۰	۱۲۰
coef_a (£)	۱۰۰	۲۲۰	۱۵۰	۲۱۰
coef_b (£/MWh)	۱/۱	۱/۶	۲/۵	۲
coef_c (£/MW ² h)	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۵
Shut_down_cost (£)	۰	۰	۰	۰

اطلاعات بار

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
بار (MW)	۵۱۹/۹	۵۰۰/۴	۴۸۴/۸	۴۷۰/۵	۴۷۸/۳	۴۸۵/۴
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بار (MW)	۴۹۶/۵	۵۱۸/۱	۵۴۶/۵	۵۷۲/۵	۵۸۹/۳	۵۸۸/۹
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
بار (MW)	۵۸۴/۵	۵۷۳/۲	۵۶۱/۹	۵۵۵/۹	۵۶۳/۴	۵۷۰/۱۰
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بار (MW)	۵۹۵/۱	۶۳۳/۱	۶۷۵/۵	۶۴۰/۹	۵۹۱/۲	۵۶۳/۶

دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

ج- تولید واحدها در حضور نیروگاه خورشیدی و با کاهش انعطاف‌پذیری (MW)

ب- تولید واحدها در حضور نیروگاه خورشیدی و با اطلاعات مبنا (MW)

ساعت	واحد اول	واحد دوم	واحد سوم	واحد چهارم
۱	۸۰	۲۵۰	۱۸۵	۰
۲	۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۰
۳	۸۰	۲۵۰	۱۵۰	۰
۴	۸۰	۲۵۰	۱۴۲/۵	۰
۵	۸۰	۲۵۰	۱۴۷/۵	۰
۶	۸۰	۲۵۰	۱۵۲/۵	۰
۷	۸۰	۲۵۰	۱۵۷/۵	۰
۸	۸۰	۲۵۰	۱۶۲/۵	۰
۹	۸۰	۲۵۰	۱۵۷/۵	۰
۱۰	۸۰	۲۵۰	۹۵	۰
۱۱	۸۰	۲۲۰	۷۵	۰
۱۲	۸۰	۱۸۲/۵	۷۵	۰
۱۳	۸۰	۱۵۲/۵	۷۵	۰
۱۴	۸۰	۱۴۵	۷۵	۰
۱۵	۸۰	۱۵۰	۷۵	۰
۱۶	۸۰	۱۶۰	۷۵	۰
۱۷	۸۰	۱۷۰	۷۵	۰
۱۸	۸۰	۲۲۰	۷۵	۰
۱۹	۸۰	۲۵۰	۱۱۰	۶۰
۲۰	۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۶۰
۲۱	۸۰	۲۵۰	۲۳۰	۰
۲۲	۸۰	۲۵۰	۲۳۰	۰
۲۳	۸۰	۲۵۰	۲۳۰	۰
۲۴	۸۰	۲۵۰	۲۳۰	۰

ساعت	واحد اول	واحد دوم	واحد سوم	واحد چهارم
۱	۸۰	۲۵۰	۱۸۵	۰
۲	۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۰
۳	۸۰	۲۵۰	۱۵۰	۰
۴	۸۰	۲۵۰	۱۴۲/۵	۰
۵	۸۰	۲۵۰	۱۴۷/۵	۰
۶	۸۰	۲۵۰	۱۵۲/۵	۰
۷	۸۰	۲۵۰	۱۵۷/۵	۰
۸	۸۰	۲۵۰	۱۶۲/۵	۰
۹	۸۰	۲۵۰	۱۵۷/۵	۰
۱۰	۸۰	۲۵۰	۹۵	۰
۱۱	۸۰	۲۲۰	۷۵	۰
۱۲	۸۰	۱۸۲/۵	۷۵	۰
۱۳	۸۰	۱۵۲/۵	۷۵	۰
۱۴	۸۰	۱۴۵	۷۵	۰
۱۵	۸۰	۱۵۰	۷۵	۰
۱۶	۸۰	۱۶۰	۷۵	۰
۱۷	۸۰	۱۷۰	۷۵	۰
۱۸	۸۰	۲۲۰	۷۵	۰
۱۹	۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۰
۲۰	۸۰	۲۵۰	۲۳۵	۶۰
۲۱	۸۰	۲۵۰	۲۶۷/۵	۶۰
۲۲	۸۰	۲۵۰	۲۴۵	۶۰
۲۳	۸۰	۲۵۰	۲۶۵	۰
۲۴	۸۰	۲۵۰	۲۳۰	۰