

بررسی اثرات نفوذ منابع بادی در میزان مشارکت سمت مصرف در برنامه‌های پاسخگویی بار

آرمین تیموری، جواد صائبی، محمدحسین جاویدی

دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد - ایران

arminteymoori@gmail.com

در شبکه‌های قدرت گردیده است. به دلیل وجود عدم قطعیت در تولید بادی، ناشی از وابستگی آن به شرایط اقلیمی و سرعت باد، نیازمند برنامه‌ریزیهای پیچیده‌تری در مدیریت شبکه و بازار برق بوده و اهمیت پیشبینی دقیق اثرات منابع بادی بر روی شبکه قدرت افزایش یافته است.

اثرات نفوذ منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت به میزان انعطافپذیری سیستم قدرت ارتباط دارد. با افزایش انعطافپذیری سیستم قدرت، اثرات نفوذ منابع تجدیدپذیر در افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نوسانهای رزرو سیستم را می‌توان کنترل نمود. یکی از راه‌های موثر در افزایش انعطافپذیری سیستم قدرت، استفاده از پاسخگویی بار در بهره‌برداری از شبکه می‌باشد. در واقع، برنامه‌های پاسخگویی بار با فراهم آوردن رزرو مجازی، که دارای عملکرد سریع برای سیستم جهت جبران عدم توازن تولید و مصرف می‌باشد، ضمن کاهش اثرات ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، امکان نفوذ این منابع را بیش از پیش فراهم می‌کنند [۱-۳].

مطالعات زیادی در زمینه کاهش اثرات ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، به ویژه انرژی بادی، در بهره‌برداری سیستم قدرت از طریق مدیریت مصرف صورت گرفته است [۴-۹]. با این وجود، در اکثر این مطالعات، کاهش قیمت‌های بازار انرژی ناشی از نفوذ مقادیر بالای انرژی بادی در نظر گرفته شده است. نفوذ مقادیر بالای منابع بادی در سیستم قدرت، به دلیل کاهش هزینه‌های تولید، قیمت‌های انرژی را کاهش می‌دهد [۱۰]. در نتیجه، کاهش قیمت‌ها سبب کاهش تمایل سمت مصرف به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار می‌گردد.

هدف اصلی این مقاله بررسی کمی میزان کاهش تمایل سمت مصرف به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار با نفوذ مقادیر بالای تولید بادی در

چکیده— نفوذ منابع بادی در شبکه‌های قدرت باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در تولید انرژی می‌گردد. این عدم قطعیت باعث ایجاد اختلاف بین مقادیر پیشبینی و قطعی تولید می‌شود. بهره‌بردار برای پوشش این اختلاف مجبور به در نظر گرفتن بخشی از ظرفیتهای تولید به عنوان رزرو می‌گردد که این موضوع هزینه‌ی رزرو را در پی خواهد داشت. پاسخگویی بار بعنوان راهکاری مناسب برای مقابله با اثرات عدم قطعیت‌های تولید بادی در بهره‌برداری سیستم قدرت می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از طرفی، نفوذ مقادیر بالای تولید بادی کاهش قیمت انرژی را در پی خواهد داشت. این کاهش قیمت انرژی منجر به کاهش تمایل مصرفکنندگان به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار خواهد شد. در این مقاله، ضمن بررسی اثرات نفوذ منابع بادی در کاهش هزینه‌ی تولید و افزایش هزینه‌های رزرو، تاثیر آن در کاهش انگیزه‌ی مشترکان برای شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار کمی سازی شده و میزان افزایش تشویقی در برنامه‌های پاسخگویی بار به منظور تثبیت میزان مشارکت سمت مصرف در سیستم قدرت تحت نفوذ مقادیر بالای تولید بادی محاسبه گردیده است. شبکه استاندارد IEEE RTS برای تحلیل و شبیه سازی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی — پاسخگویی بار؛ مدیریت سمت مصرف؛ بازار انرژی و رزرو؛ انرژی بادی؛ منابع تجدید پذیر؛ برنامه‌ریزی تولید

۱. مقدمه

در سالهای اخیر پیشرفتهای چشم گیری در زمینه انرژیهای بادی در جهان صورت گرفته است. این پیشرفتها باعث افزایش نفوذ منابع بادی

- سیستم قدرت میباید بدین منظور، بازار انرژی و رزرو در حضور منابع بادی تحلیل گردیده و اثرات عدم قطعیت تولید بادی در قیمت انرژی و رزرو مورد بررسی قرار میگیرد. سپس، با استفاده از مدل پاسخگویی بار ارائه شده در [۱۱]، تاثیر نفوذ تولید بادی در سیستم قدرت بر کاهش مشارکت سمت مصرف کمی میگردد.
- سیستم قدرت میباید. بدین منظور، بازار انرژی و رزرو در حضور منابع بادی تحلیل گردیده و اثرات عدم قطعیت تولید بادی در قیمت انرژی و رزرو مورد بررسی قرار میگیرد. سپس، با استفاده از مدل پاسخگویی بار ارائه شده در [۱۱]، تاثیر نفوذ تولید بادی در سیستم قدرت بر کاهش مشارکت سمت مصرف کمی میگردد.
- به هر واحد تولید انرژی i واقع در باس n به ازای تولید انرژی برنامه‌ریزی شده P_i با قیمت λ_n پرداخت انجام میشود. که λ_n قیمت نقطه‌های برنامه‌ریزی شده برای باس n میباشد.
- از هر بار j واقع در باس n هزینه مصرف بار به میزان L_j با قیمت λ_n گرفته میشود.
- به هر واحد تولید انرژی بادی q واقع در باس n به ازای تولید انرژی برنامه‌ریزی شده W_q^S با قیمت λ_n پرداخت انجام می‌شود.

۲. بازار انرژی و رزرو در حضور منابع بادی

۲.۱. تاثیرات کلی منابع بادی

تاثیرات نفوذ انرژی بادی در هر شبکه به دو عامل اساسی بستگی دارد: سطح نفوذ و انعطاف پذیری سیستم. از یک سو، افزایش سطح نفوذ انرژی بادی تاثیر پذیری سیستم را افزایش میدهد و از سوی دیگر، سیستمهای انعطاف پذیر توانایی پذیرفتن درصد بالاتری از انرژی بادی را بدون پذیرفتن اثرات ناخواسته منابع بادی دارند. تاثیرات انرژی بادی روی شبکههای قدرت به دو دسته کوتاه مدت و بلند مدت تقسیم میشوند. تاثیرات کوتاه مدت با مقیاسهای زمانی عملکردی سروکار داشته و شامل موضوعات مرتبط با پایداری و تعادل سیستم است. این در حالی است که تاثیرات بلند مدت شامل برنامه‌ریزی برای زمانهای اوج مصرف است [۱۲].

۲.۲. تعیین قیمت انرژی و رزرو در

شبکه‌های تحت نفوذ منابع بادی

به منظور بررسی اثرات نفوذ منابع بادی بر قیمت انرژی و رزرو، از مدل بازار انرژی و رزرو ارائه شده در [۱۱] استفاده شده است. در این مدل، قیمت انرژی و رزرو در یک پریود زمانی از حل مسئله بهینه سازی خطی ارائه شده در [۱۱] بدست می‌آید. در مدل بازار انرژی و رزرو [۱۱]، مقادیر انرژی فروخته شده و قیمت آن، برخلاف سایر روشهای متداول که معمولاً این کار را طی دو مرحله انجام میدهند، در یک مرحله شبیه‌سازی تعیین میشود. با توجه به در نظر گرفته شدن مهمی حالت‌های ممکن تولید بادی از طریق سناریوها، مهمی قیمت گذارهای ممکن در این برنامه‌ریزی یک مرحله‌ای در نظر گرفته میشود و نتایج بدست آمده در این شبیه سازی دقیقترین نتایج ممکن هستند. طرح قیمت گذاری بدست آمده از حل مسئله بهینه سازی ذکر شده از قوانین زیر پیروی میکند [۱۱]:

۳. مدل پاسخگویی بار

در این قسمت جهت بررسی اثرات نفوذ منابع بادی در برنامه‌های پاسخگویی بار از مدل اقتصادی ارائه شده در [۱۳] که نشان‌دهنده میزان تغییرات مصرف تحت تاثیر تغییرات قیمت ناشی از نفوذ منبع بادی، پاداش و جریمه میباشد استفاده شده است.

با توجه به مدل تک پریودی بازار انرژی و رزرو استفاده شده در این مقاله، امکان جابه‌جایی مصرف از زمانهای اوج به زمانهای کم باری وجود ندارد. لذا، پاسخگویی بار استفاده شده از نوع قطع و وصل بار در همان زمان مورد نظر است و مدل بارهای الاستیک تک زمانی برای پاسخگویی بار استفاده میشود.

$$A(i) = \rho_0(i) - \rho(i) + \left(\frac{d(i)}{d_0(i)} - 1\right) \left(\frac{\rho_0(i)}{E(i,i)}\right) \quad (2)$$

همانگونه که اشاره گردید، در این رابطه $\rho(i)$ قیمت تغییر یافته انرژی تحت نفوذ منابع بادی و $\rho_0(i)$ قیمت اولیه انرژی میباشد.

۴. نتایج شبیهسازی

در این قسمت اثرات نفوذ منابع بادی بر بازار انرژی و رزرو و میزان مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار از طریق پیاده‌سازی مدل برنامه ریزی بازار و پاسخگویی بار ارائه شده بر روی شبکه استاندارد 24-bus IEEE Reliability Test System-1996 مورد بررسی قرار میگیرد. پیاده‌سازی نرم‌افزاری و شبیهسازی این مدل با استفاده از نرم افزار GAMS تحت سیستم عامل ویندوز صورت گرفته است.

شبکه ۲۴ باسه مورد شبیه سازی شامل ۳۴ خط انتقال، ۱۲ ژنراتور و ۱۷ بار مصرفی است [۱۴]. قیمت انرژی ارائه شده توسط واحدهای هسته‌ای و آبی صفر در نظر گرفته شده‌است. فرض بر این است که واحدهای هسته‌ای و آبی قادر به تامین ظرفیت رزرو نیستند.

کل بار شبکه ۲۲۸۰ مگاوات فرض شده که از نظر جغرافیایی بین باسها توزیع شده است و بارها دارای هزینه‌یاز دست رفتن $\$/MWh$ ۲۰۰۰ میباشند [۱۱]. نتایج بدست آمده مربوط به درصد نفوذ بادی ۳۰ درصدی است؛ منظور از درصد نفوذ بادی نسبت ظرفیت بادی قابل استفاده به کل بار موجود در شبکه میباشد. در این شرایط حداکثر انرژی بادی قابل تولید توسط توربینها ۶۰۰ مگاوات است. توجه شود که در شبیه‌سازیهای انجام شده فرض شده است که هزینه‌ی تولید بادی برابر با صفر میباشد [۱۰].

برای این شبیه سازی اطلاعات منابعدادی شبکه ایرلند مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵]. ۱۱ حالت مختلف به طوری که هر حالت شامل اطلاعات پیشبینی و تولید بادی در یک روز میان هفته و در یک ساعت مشخص در ماههای مختلف یک سال است، مورد استفاده قرار میگیرد. این طرز استفاده از اطلاعات به دلیل وجود امکان مقایسه‌ی بهتر نتایج بدست آمده در حالات مختلف این شبیه‌سازی میباشد. با توجه به سرعت متغیر باد انتخاب تعداد مناسبی از سناریوها حائز اهمیت میباشد. با این وجود در این مقاله، به منظور سادگی تحلیل نتایج سه سناریوی تولید بادیلحاظ شده است (low, pre, high) که مقدار تولید بادیدر هر سناریو با توجه به مقدار تولید بادی پیشبینی شده و مقدار واقعی تولید بادی به شرح زیر تعریف میگردد:

۳.۱. مدل بارهای الاستیک تک زمانی

در این مدل میزان مصرف مشترکان بعد از شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$d(i) = d_0(i) \left\{ 1 + E(i,i) \cdot \frac{[\rho(i) - \rho_0(i) + A(i) + pen(i)]}{\rho_0(i)} \right\} \quad (1)$$

در این رابطه $d(i)$ مصرف تغییر یافته بعد از شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار، $d_0(i)$ مصرف اولیه، $E(i,i)$ ضریب الاستیسیته خودی، $\rho(i)$ قیمت تغییر یافته انرژی، $\rho_0(i)$ قیمت اولیه انرژی، $A(i)$ مبلغ تشویق در نظر گرفته شده برای شرکت کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار و $pen(i)$ مبلغ جریمه‌ی در نظر گرفته شده برای تخطی کنندگان از قراردادهای منعقد شده برای پاسخگویی بار میباشد.

با توجه به رابطهی (۱) واضح است که اگر تشویق و جریمه‌های وجود نداشته‌باشد و قیمت انرژی نیز ثابت بماند، تغییری در مصرف مشترکان ایجاد نخواهد شد.

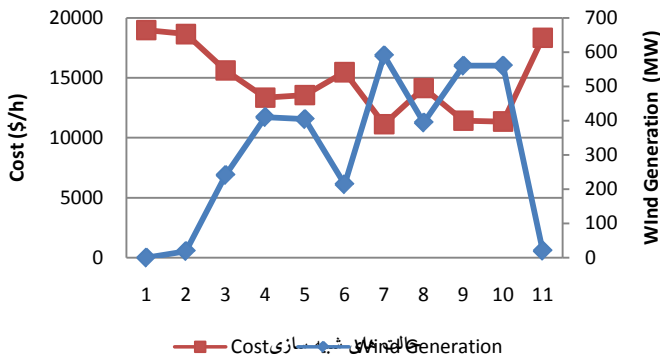
۳.۲. محاسبه‌ی تشویق در حضور منابع

بادی

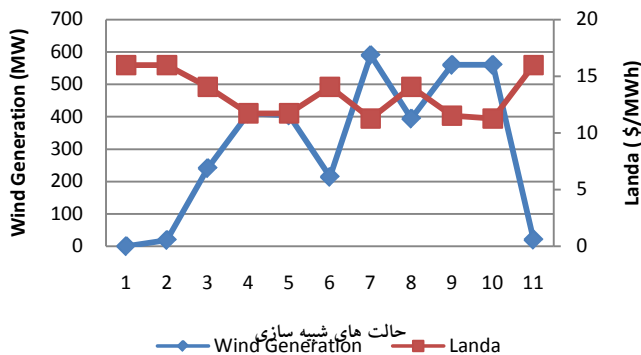
همانطور که ذکر گردید، نفوذ منابع بادی در سیستم قدرت کاهش تمایل سمت مصرف به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار را به همراه خواهد داشت. یکی از اهداف این پروژه محاسبه کمی میزان افزایش تشویقی به مصرفکننده‌هاست با این هدف که میزان پاسخگویی بار در حضور تولید بادی حداقل برابر با پاسخگویی بار در حالت بدون تولید بادی باشد. اگر فرض کنیم وقتی تولید بادی نداریم هیچ جریمه و تشویقی برای مصرفکنندگان در نظر گرفته نشده است، با توجه به عدم تغییر قیمت در حالت بدون باد مصرف در همان مقدار قبلی ثابت باقی میماند. حال اگر بخواهیم پاسخگویی بار وقتی تولید بادی داریم با پاسخگویی بار در حالت عدم حضور تولید بادی یکسان باشد، با توجه به کاهش قیمت ناشی از حضور باد مجبور به افزایش مبلغ تشویقی خواهیم بود.

به منظور محاسبه‌ی مبلغ تشویق مورد نیاز در حضور منابع بادی از رابطهی (۱) به نحوی استفاده میشود که با مشخص بودن تغییرات قیمت ناشی از نفوذ منابع بادی و همچنین ثابت ماندن مصرف و عدم تغییر آنست به حالت بدون باد، مبلغ تشویق $A(i)$ به صورت رابطه (۲) بدست آید:

بادی وجود ندارد. در این حالت قیمت انرژی ۱۵/۹۷۳ دلار بر مگاوات ساعت است. با افزایش میزان تولید بادی این قیمت کاهش مییابد به طوری که در حالتی که تولید بادی ۵۹۰ مگاواتی است این قیمت برابر با ۱۱/۲۵۷ دلار بر مگاوات ساعت است. همانگونه که مشاهده می‌گردد با کاهش تولید بادی این قیمت افزایش مییابد.



شکل ۱. تغییرات هزینه ی تحمیل شده به سیستم با توجه به تغییرات تولید بادی



شکل ۲. تغییرات قیمت انرژی با توجه به تغییرات تولید بادی

• برای کاهش ریسک وقوع سوددهی منفی در واحدهایی که قادر به ایجاد تغییرات در تولید، همزمان با تغییر بار هستند، ظرفیت رزرو پیشنهادی ارائه می‌گردد. امکان پیشنهاد ظرفیت رزرو توسط واحد - ها باعث ایجاد رقابت بین واحدها برای بدست آوردن سود بیشتر و همزمان ایجاد یک شبکه انعطاف پذیرتر میشود. وقتی بین مقدار پیشبینی شده و مقدار انرژی تولید شده اختلاف وجود داشته باشد نیاز به ظرفیت رزرو برای جبران این اختلاف احساس میشود. این رزرو متناسب با مقدار پیشبینی و تولید واقعی میتواند هم کاهش تولید و هم افزایش تولید را شامل بشود. خطای پیشبینی به صورت اختلاف مقدار پیشبینی شده و مقدار واقعی تولید بادی تعریف میشود. درصد خطای پیش بینی نیز نرمالیزه شده این

- سناریوی pre: تولید بادی برابر با مقدار تولید پیشبینی شده
- سناریوی high: تولید بادی برابر با حاصل جمع اختلاف مقدار پیشبینی شده و مقدار واقعی تولید با مقدار پیشبینی شده
- سناریوی low: تولید بادی برابر با تفاضل اختلاف مقدار پیش بینی شده و مقدار واقعی تولید از مقدار پیشبینی شده

برای هر سناریو یک احتمال رخداد تعریف میشود. به طوری که احتمال رخ دادن سناریو low سی درصد، سناریو pre پنجاه درصد و سناریو high بیست درصد است [۱۱].

۴.۱. تحلیل نتایج نفوذ منابع بادی بر روی

قیمتها

از شبیهسازی روی شبکه IEEE RTS نتایج زیر بدست آمده است:

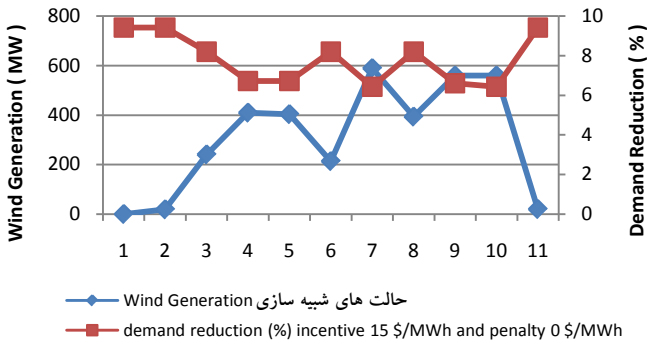
- بیشترین هزینهی تحمیلشده به شبکه مربوط به حالتی است که تولید بادی وجود ندارد. میزان تولید بادی در همهی حالات از صفر تا ۵۹۰ مگاوات تغییر میکند و کمترین هزینه مربوط به زمانی است که بیشترین میزان تولید بادی یعنی ۵۹۰ مگاوات وجود دارد. شکل ۱ تغییرات تولید بادی و هزینهی تحمیل شده به شبکه را نشان میدهد. با توجه به شکل، افزایش تولید بادی منجر به کاهش هزینه و کاهش تولید بادی باعث افزایش هزینه میگردد.
- در این مقاله، برای سادگی کار، ظرفیت انتقال توان خطوط نامحدود فرض شده است. در این شرایط انرژی بادی تولیدی در باسهای ۷ و ۸ شرایط یکسانی برای رسیدن به باسهای مختلف داشته و یکسان بودن شرایط باسهای مختلف باعث برابری قیمت انرژی در باسهای شبکه میگردد. از این رو جهت تحلیل قیمتها فقط یک باس به عنوان نمونه بررسی میگردد. از نظر اقتصادی، ضرایب لاگرانژ (قیمت آخرین مگاوات تولیدی محاسبه شده در روز قبل، λ_{t-1}) نشاندهنده قیمت تغییرات قطعی و از پیش معین بار هستند. برای اینگونه تغییرات واحدهای تولیدی انعطاف ناپذیر با استفاده از برنامهریزیهای از قبل انجام شده مورد استفاده قرار میگیرند. در شکل ۲ تغییرات ضریب لاگرانژ یا قیمت انرژی (بر حسب دلار بر مگاوات ساعت) با توجه به تغییرات تولید بادی مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین قیمت انرژی مربوط به حالتی است که تولید

میزان تولید بادی در این حالت کم است و در نتیجه ظرفیت رزرو کمی برای پوشش آن مورد نیاز است. در نتیجه هزینه و قیمت رزرو از آن چه انتظار می‌رود پایتتر است.

۴.۲. تحلیل نتایج نفوذ منابع بادی بر میزان

مشارکت سمت مصرف

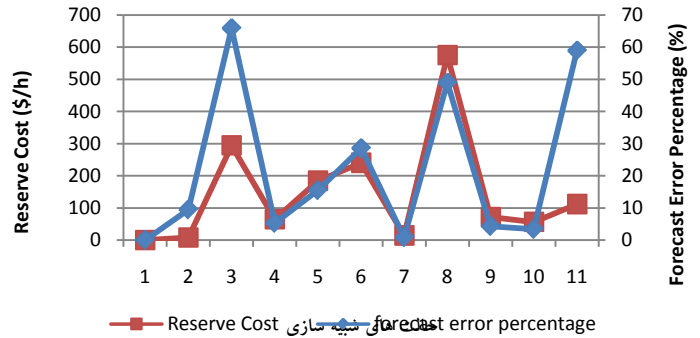
در این مقاله، استراتژی مورد استفاده برای پیاده سازی مدل پاسخگویی بار شامل هیچ جریمه‌ای نمی‌شود و از تشویقی به میزان $15\$/MWh$ به عنوان عامل ایجاد انگیزه در مصرف‌کنندگان استفاده شده است. در این حالت با وجود این که افزایش تولید بادی قیمت انرژی را کاهش می‌دهد، وجود تشویق ۱۵ دلاری به ازای هر مگاوات ساعت باعث ایجاد انگیزه‌ی کاهش مصرف و نهایتاً با توجه به فرمول ارائه شده منجر به کاهش مصرف مشترکان خواهد شد. در این شرایط هر چه تولید بادی بیشتر شود به علت کاهش قیمت انرژی ناشی از افزایش تولید بادی، همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، میزان کم شدن مصرف در برنامه‌ی پاسخگویی بار کاهش می‌یابد.



شکل ۵. میزان کاهش مصرف در برنامه‌ی پاسخگویی بار با توجه به تغییرات تولید بادی

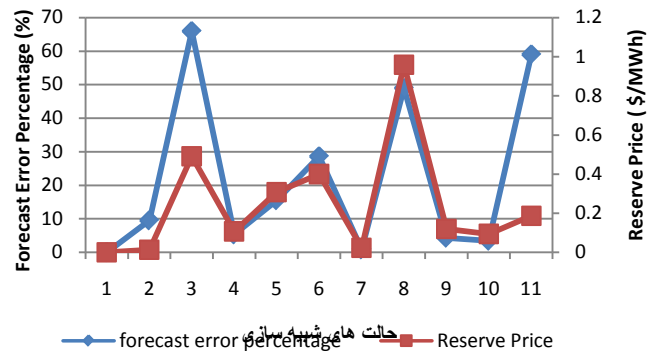
برای محاسبه‌ی میزان افزایش تشویقی به مصرف کنندگان با این هدف که میزان پاسخگویی بار در حضور تولید بادی حداقل برابر با پاسخگویی بار در حالت بدون تولید باد باشد از رابطه‌ی (۲) استفاده می‌گردد. بدین منظور، در تمام حالتها $d(i)$ برابر با میزان مصرف بعد از شرکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار بدون تولید بادی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرمول ارائه شده، با نفوذ تولید بادی تشویق مورد نیاز برای ثابت ماندن میزان پاسخگویی بار افزایش می‌یابد؛ به طوری که همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است هر چقدر تولید بادی

مقدار با تقسیم آن بر مقدار واقعی تولید می‌باشد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، هر چقدر خطای پیش‌بینی بیشتر شود مقدار هزینه‌ی رزرو تحمیل‌شده به سیستم نیز بیشتر می‌شود و با کاهش خطای پیش‌بینی شاهد کاهش هزینه رزرو خواهیم بود.



شکل ۳. تغییرات هزینه‌ی رزرو تحمیل شده به سیستم با توجه به خطای پیش

بینی



شکل ۴. تغییرات قیمت رزرو با توجه به تغییرات خطای پیش بینی

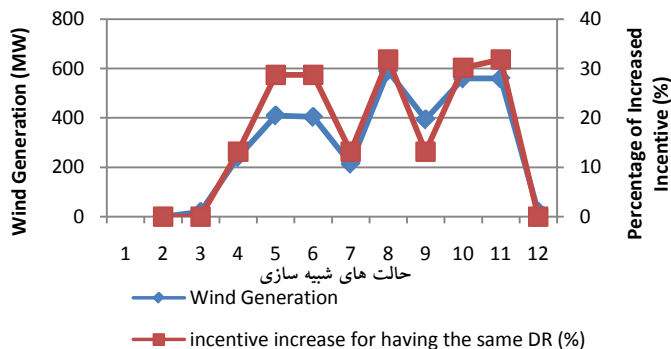
- قیمت رزرو به صورت حاصل تقسیم هزینه‌ی رزرو به مقدار کل تولید بادی نصب شده تعریف می‌گردد [۱۰]. با استدلالی مشابه آنچه برای هزینه رزرو انجام شد، مشخص می‌شود که هر چقدر خطای پیش‌بینی بیشتر شود قیمت رزرو نیز بیشتر می‌شود و هر چقدر این خطا کمتر شود قیمت رزرو کمتر می‌شود. تغییرات قیمت رزرو با توجه به تغییرات خطای پیش‌بینی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با دقت در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد که در بعضی حالات با وجود بالا بودن درصد خطای پیش‌بینی هزینه و قیمت رزرو مقدار بسیار کمی دارد. چنین وضعیتی به وضوح در حالت ۱۱ قابل مشاهده است. این قیمت رزرو پایین به این دلیل است که با وجود درصد خطای پیش‌بینی و نوسانات بادی بالا،

جهت یکسان نگه داشتن پاسخگویی بار با حالتی که شبکه فاقد منابع بادی است بیشتر می‌گردد.

افزایش یابد درصد افزایش مبلغ تشویق مورد نیاز برای دست یابی به این مهم نیز افزایش می‌یابد. واضح است که با افزایش هر چه بیشتر مبالغ تشویقی در حضور تولید بادی میتوان میزان مشارکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار را افزایش داد.

منابع

- [1] Moura, P. S., De Almeida, A. T., "The role of demand-side management in the grid integration of wind power", Applied Energy, Vol. 87, No. 8, pp. 2581-2588, 2010.
- [2] Pina, A., Silva, C., Ferrão, P., "The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity", Energy, Vol. 41, No. 1, pp. 128-137, 2012.
- [3] Sioshansi, W. Short, "Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 516-524, 2009.
- [4] Ilic, M. D., Xie, L., Joo, J., "Efficient Coordination of Wind Power and Price-Responsive Demand—Part I: Theoretical Foundations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 875-1884, 2011.
- [5] Ilic, M. D., Xie, L., Joo, J., "Efficient Coordination of Wind Power and Price-Responsive Demand—Part II: Case Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 1885-1893, 2011.
- [6] Klobasa, M., "Analysis of demand response and wind integration in Germany's electricity market", IET renewable Power Generation, Vol. 4, No. 1, pp. 55-63, 2010.
- [7] Kwag, H. G., Kim J. O., "Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints", Applied Energy, Vol. 96, pp. 161-170, 2012.
- [8] Khodaei, A., Shahidepour, M., Bahramirad, S., "SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 3, pp. 564-571, 2011.
- [9] Cecati, C., Citro, C., Siano, P. "Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 4, pp. 468-476, 2011.
- [10] Morales, J. M., Conejo, A. J., Pérez-Ruiz, J., "Simulating the impact of wind production on locational marginal prices", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp. 820-828, 2011.
- [11] Juan M. Morales, Antonio J. Conejo, Kai Liu and Jin Zhong, "Pricing Electricity in Pools With Wind Producers", IEEE Transactions on power systems, Vol. 27, No. 3, August 2012
- [12] Albadi, M. H., and El-Saadany, E. F., "Overview of wind power intermittency impacts on power systems", Electric Power System Research, Vol. 80, No. 6, pp. 627-632, 2010
- [13] Aalami, H. A., M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Demand Response Modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs", Applied Energy 87.1 (2010): 243-250
- [14] "The IEEE Reliability Test System-1996", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999
- [15] <http://www.eirgrid.com>



شکل ۶. تغییرات درصد افزایش مبلغ تشویق مورد نیاز برای ثابت ماندن

پاسخگویی بار

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، اثرات نفوذ منابع بادی بر میزان مشارکت سمت مصرف در برنامه‌های پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفت و مبالغ تشویق مورد نیاز برای تثبیت این مشارکت محاسبه گردید. بدین منظور، ابتدا بازار انرژی و رزرو در حضور منابع بادی مورد تحلیل قرار گرفت و قیمت‌های انرژی و رزرو به ازای مقادیر مختلف تولید بادی استخراج گردید. سپس، با استفاده از مدل مناسب برای پاسخگویی بار، تاثیر نفوذ منابع بادی در سیستم قدرت بر میزان مشارکت سمت مصرف کمی سازی گردید. شبکه ۲۴ باسه IEEE RTS برای تحلیل و شبیه‌سازی استفاده گردید. شبیه‌سازیهای انجام شده نشان داد که نفوذ منابع بادی با وجود اضافه کردن هزینه‌های به عنوان هزینه رزرو به سیستم، به طور کلی منجر به کاهش هزینه تولید و به تبع آن قیمت انرژی میگردد. این کاهش قیمت انگیزه مصرفکنندگان شرکتکننده در برنامه‌های پاسخگویی بار برای کاهش مصرف را از بین برده و منجر به افزایش مصرف میگردد. بنابراین، به منظور جلوگیری از کاهش مشارکت سمت مصرف، مبالغی به عنوان تشویق برای مصرفکنندگان در نظر گرفته میشود. نتایج بررسیها حاکی از این است که میزان افزایش تشویقی به منظور تثبیت انگیزه مصرفکنندگان برای شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار در حضور منابع بادی در سیستم قدرت مینبایست ۳۰ درصد افزایش یابد. هم چنین نشان داده شد که هر چه قدر تولید بادی افزایش یابد مبلغ تشویق مورد نیاز