

برنامه‌ریزی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع هوشمند در حضور منابع تجدیدپذیر، برنامه‌های پاسخگویی بار و ترکیبی از پیل سوختی و الکترو لایزر به عنوان سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی

مهرداد قهرمانی^۱

^۱ دانشکده مهندسی برق، تبریز، ایران، Mehrdad.ghahramani@yahoo.com

چکیده: حضور منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین بارهای متناوب از اصلی‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های توزیع برق آینده خواهد بود. با توجه به ماهیت دارای عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای متناوب، اپراتور شبکه‌ی توزیع به یک برنامه‌ریزی بهینه‌ی بمنظور تامین اقتصادی، قابل اطمینان و پایدار انرژی الکتریکی نیازمند می‌باشد که در برابر تغییرات پارمترهای غیر قطعی ورودی مانند باد و بار مقاوم باشد. در این مقاله یک روش بهینه‌سازی مقاوم برمبنای برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) ارائه شده است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌ی روز-بعد شبکه‌ی توزیع در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار و منابع تولید تجدیدپذیر (توربین بادی و سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی) و تجدیدناپذیر (دیزل ژنراتور) می‌باشد. روش ارائه شده تمامی قیود تکنیکی شبکه و دیزل ژنراتورها و سیستم ذخیره انرژی مورد استفاده را در نظر می‌گیرد. به منظور مدلسازی هرچه بهتر شبکه‌های توزیع برق آینده و همچنین نشان دادن کارایی روش بهینه‌سازی ارائه شده، یک شبکه تست ۳۳ باسه IEEE مورد استفاده قرار گرفته است که شامل ۴ دیزل ژنراتور، ۳ توربین بادی، ۲ بار صنعتی بزرگ، ۲ تامین کننده‌ی برنامه‌های پاسخگویی بار و ۱ سیستم ترکیبی پیل سوختی و الکترو لایزر بعنوان سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی می‌باشد. برنامه‌ریزی ارائه شده میزان بهینه‌ی تبادل با شبکه‌ی بالادست، میزان تولید هر کدام از واحدهای تولید پراکنده و نحوه‌ی مشارکت برنامه‌های پاسخگویی بار را تعیین می‌کند. همچنین یک برنامه ریزی بهینه برای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌ی توزیع هوشمند، برنامه‌ریزی روز-بعد، تولید پراکنده، توربین بادی، سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی، برنامه‌های پاسخگویی بار.

۱. مقدمه

به خود جلب کرده است [۳-۵]. برنامه‌های پاسخگویی بار نیز اگرچه موضوع جدیدی نیست اما با توجه به حرکت شبکه‌های قدرت به سمت هوشمند شدن به خصوص در سطح توزیع امکان استفاده از پتانسیل این برنامه‌ها و شرکت مشترکین در تامین بخشی از بار مورد نیاز شبکه، بیش از پیش فراهم شده است [۶].

۱.۱. تعریف مسئله

حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای متناوب با توجه به عدم قطعیتی که به همراه دارند منجر به ایجاد پیچیدگی و چالش‌هایی

رشد روز افزون مصرف جهانی انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به حرکت بیش از پیش به سمت استفاده از منابع انرژی پاک شده است [۱]. از طرف دیگر پیشرفت تکنولوژی و مقرون به صرفه‌تر شدن استفاده از منابع تولید انرژی بی‌کربن حرکت به سمت استفاده از این تکنولوژی‌ها را سرعت بخشیده است [۲]. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر انرژی بادی و خورشیدی با توجه به ماهیت غیرقطعی و غیر قابل کنترل بودن بیش از سایر انواع انرژی توجه محققان را

در برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌های توزیع آینده شده است. به عنوان مثال توربین های بادی، پنل های خورشیدی و بارهای متناوب به دلیل ماهیت عدم قطعیت و غیر قابل کنترل بودن باعث ایجاد چالش هایی از قبیل از بین رفتن بالانس توان، کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه‌ی عملکرد شبکه‌ی توزیع برای اپراتور شبکه‌ی توزیع (DNO) می‌شوند. عملکرد صحیح و مداوم این شبکه‌ها در حضور منابع تولید تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار نیازمند برنامه‌ریزی‌ای می‌باشد که در کنار کاهش هزینه‌های عملکردی در برابر عدم قطعیت پارامترهای ورودی بخصوص مصرف بار و تولید توسط باد مقاوم باشد. برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌های توزیع در دسته‌ی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت قرار می‌گیرد که بصورت ۲۴ ساعت قبل از اجرای برنامه میزان تولید واحدهای مختلف شامل توربین های بادی، دیزل ژنراتور ها، سیستم‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی و میزان خرید از شبکه بالادست تعیین می‌شود.

۱.۲. مرور منابع

مطالعات انجام شده در زمینه‌ی برنامه‌ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه‌های توزیع عمدتاً به دو دسته‌ی مطالعات قطعی (deterministic) و مطالعات تصادفی (stochastic) تقسیم می‌شوند. در حوزه مطالعات قطعی، همه‌ی ورودی‌های مسئله بصورت پارامترهای معلوم به مدل وارد می‌شوند و خروجی‌ها برای یک دوره‌ی زمانی مشخص تعیین می‌شوند. بعنوان مثال در برنامه‌ریزی قطعی شبکه‌ی توزیع بدون در نظر گرفتن ماهیت احتمالاتی متغیرهای پیش‌بینی شده، رزرو مورد نیاز شبکه‌ی توزیع قبل از برنامه‌ریزی انرژی تعیین می‌شود [۱۱-۱۳]. در [۱۱] یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه شده است که در سطح اول بر خرید از بازار روز-بعد و در مدار قرار دادن واحدهای تولید پراکنده (DG) تمرکز شده است در حالی که توزیع زمان واقعی واحدهای DG، تعاملات با بازار زمان واقعی و قطع بار تصمیماتی هستند که در مرحله دوم چارچوب ارائه شده گرفته می‌شوند. مطالعه‌ی

انجام شده در [۱۲] با در نظر گرفتن قیود شبکه، از یک الگوریتم پخش توان بهینه به منظور کمینه کردن هزینه‌ی کلی عملکرد شبکه‌ی توزیع استفاده کرده است. یک روش بر مبنای منطق فازی به منظور برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع در [۱۳] ارائه شده است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های عملکرد از یک طرف و کمینه کردن آلودگی‌های زیست محیطی از طرف دیگر است. اگرچه این مطالعات تصمیم‌گیرندگان را در کسب یک دیدگاه کلی نسبت به مسائل بهینه‌سازی باری می‌دهند، اما نمی‌توانند عدم قطعیت موجود در اتخاذ تصمیمات استراتژیک در دنیای واقعی را نشان دهند. همچنین بدلیل عدم وجود روش‌های پیش‌بینی دقیق، روش بهینه‌سازی قطعی برای برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه توزیع قابل قبول نیست. در مطالعات تصادفی، پارامترهای غیر قطعی‌ای وجود دارند که مقدار آنها توسط توزیع‌های احتمالی مشخص قابل تخمین است و هدف کلی آنها بهینه‌سازی مقدار مورد انتظار یک تابع هدف می‌باشد. بعنوان مثال برنامه‌ریزی رزرو مورد نیاز شبکه توزیع در کنار برنامه‌ریزی روز-بعد انرژی مورد نیاز بر اساس سناریوهای احتمالاتی انجام می‌گیرد. در [۱۴] متغیرهای غیرقطعی مربوط به برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع بوسیله‌ی توابع توزیع احتمالاتی مدل شده‌اند و برنامه‌ریزی رزرو در کنار برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع بر مبنای سناریوهای احتمالاتی انجام گرفته است. در [۱۵] مدل ارائه شده در [۱۱] توسعه یافته است بطوریکه هزینه مورد انتظار عملکرد شبکه‌ی توزیع کمینه شده و در کنار آن ریسک مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در مسئله در این مطالعه در نظر گرفته شده است. با این وجود مدل تصادفی ارائه شده در این مرجع بر برنامه‌ریزی انرژی بدون در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر تمرکز کرده و ریسک مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در مسئله در یک سطح از پیش تعیین شده محدود شده است. نویسندگان [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو سطحی بمنظور برنامه‌ریزی انرژی و رزرو شبکه‌های توزیع هوشمند با هدف کمینه کردن هزینه‌های عملکردی مورد انتظار شبکه ارائه کرده‌اند. در مرجع [۱۷] یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی ریسک پایه برای برنامه‌ریزی شبکه‌ی

متغیرهای تصادفی ایمن باشد. همچنین در این مقاله برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر بر مبنای بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط صورت گرفته است. مدل ارائه شده چگونگی عملکرد کوتاه مدت شبکه شامل میزان تبادل با شبکه‌ی بالادست، تولید منابع پراکنده شامل توربین‌های بادی، سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی و دیزل ژنراتورها و نحوه مشارکت بارهای پاسخگوی بار را به صورتی که هزینه‌ی عملکرد شبکه کمینه شود تعیین می‌کند. علاوه به منظور ارائه مدلی از شبکه‌های توزیع آینده، در شبکه‌ی ۳۳ باسه ارائه شده حضور دیزل ژنراتورها و منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر شامل توربین های بادی و یک ترکیبی از پیل سوختی و الکترولایزر بعنوان سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی و همچنین بارهای پاسخگو به قیمت برق در نظر گرفته شده است. اهداف روش ارائه شده این است که هزینه کلی شبکه توزیع هوشمند را با توجه به مقادیر پیش بینی شده تولید توسط باد و مصرف بار مینیمم کند مادامی که تضمین کند برنامه ریزی انرژی و رزرو روز بعد در حین تغییر متغیرهای غیرقطعی شبکه توزیع ارائه شده قابل اطمینان باقی بمانند. همچنین به منظور نشان دادن تاثیر حضور سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی در این مقاله دو حالت مختلف برای شبکه در نظر گرفته شده است که این دو حالت بصورت زیر است:

- **حالت اول:** در این حالت برنامه ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع بدون حضور سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی انجام گرفته و هزینه‌ی عملکرد سیستم گزارش شده است.
- **حالت دوم:** در این حالت برنامه ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع در حضور سیستم ذخیره کننده‌ی هیدروژنی انجام گرفته و هزینه‌ی عملکرد سیستم گزارش شده است.

۱.۴ ساختار مقاله

ادامه‌ی مقاله به این صورت است که در بخش ۲ مدل‌سازی ریاضی شامل تابع هدف و قیود مسئله ارائه شده است. روش بهینه‌سازی مقاوم که به منظور مدل‌سازی عدم ارائه شده در بخش ۳ توضیح

توزیع هوشمند ارائه شده است که دارای اهداف کمینه‌کردن هزینه عملکرد و مدیریت ریسک می‌باشد. مرجع [۱۸] یک مدل چند هدفه تصادفی برای برنامه ریزی بهینه شبکه‌های توزیع ارائه کرده است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌ی عملکرد و آلودگی‌های زیست محیطی است. همچنین در این مطالعه پاسخگویی طرف مصرف کننده نیز بعنوان یکی از منابع تامین کننده‌ی انرژی در نظر گرفته شده است. میزان دقت و بهینه بودن روش های تصادفی به دقت توزیع احتمالاتی متغیرهای غیرقطعی و تعداد سناریوهایی که در طول مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شده، بستگی دارد. عدم وجود داده‌های تاریخی کافی منجر به یک توزیع احتمالاتی غیردقیق از متغیرهای تصادفی و در نتیجه منجر به نتایج غلط خواهد شد. علاوه با افزایش تعداد سناریو ها پیچیدگی‌های محاسباتی مسئله بهینه سازی بشدت افزایش می‌یابد.

۱.۳ نوآوری‌ها و کارهای انجام گرفته در این

مقاله

با توجه به اطلاعات نویسندگان تا به حال تاثیر سیستم ذخیره کننده‌ی هیدروژنی در برنامه ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه‌های توزیع در نظر گرفته نشده است. همچنین تاکنون از این سیستم در جهت بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع استفاده نشده است. این مقاله یک چارچوب بهینه سازی بر مبنای مفاهیم روش بهینه سازی مقاوم ارائه می‌کند که می‌تواند مشکلات دو روش قطعی و تصادفی را در نظر بگیرد بطوریکه این روش، متغیرهای تصادفی را با توزیع نام شخص و به صورت آزاد از محدودیت مدل می‌کند که می‌تواند جواب های بهینه‌ای را بیابد که در مقابل بدترین شرایط عدم قطعیت ایمن باشد. در مقایسه با بهینه‌سازی تصادفی، روش ارائه شده چندین مزیت دارد. اول آنکه این روش تنها به مقادیر پیش‌بینی شده حد بالا و حد پایین متغیر های تصادفی نیاز دارد که بدست آوردنشان از داده‌های تاریخی راحت تر است. دوم، برخلاف روش‌های تصادفی که از تضمین‌های احتمالاتی برای ارضای قیود استفاده می‌کنند روش ارائه شده به دنبال جواب های بهینه‌ای است که در مقابل همه‌ی تغییرات

شده‌اند. قسمت سوم مربوط به هزینه‌ی مربوط به تامین‌کننده‌های برنامه‌های پاسخگویی بار (DRP) شامل هزینه‌ی تامین انرژی () CE_{DRP} و هزینه‌ی تامین رزرو (CR_{DRP}) می‌باشد که به ترتیب توسط معادلات (۳۳) و (۳۶) معرفی شده‌اند. قسمت چهارم هزینه‌ی مربوط به شرکت بارهای صنعتی در برنامه‌های پاسخگویی بار شامل هزینه‌ی تامین انرژی (CE_{IL}) و هزینه‌ی تامین رزرو (CR_{IL}) توسط این واحدها می‌باشد که به ترتیب توسط معادلات (۳۸) و (۳۹) مدل شده‌اند. اندیس $t=1, \dots, NT$ معرف زمان، اندیس $j=1, \dots, NDG$ نشان دهنده‌ی واحدهای DG، اندیس $d=1, \dots, NDRP$ مربوط به DRP ها و اندیس $i=1, \dots, NIL$ مربوط به بارهای صنعتی بزرگ است.

۲.۲. قیود

قیود مربوط به برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع شامل قیود مساوی و نامساوی در این بخش آمده است.

[۱] قیود شبکه‌ی توزیع

به منظور اطمینان از عملکرد ایمن و صحیح شبکه‌ی توزیع قیود (۲) و (۳) در شبکه‌ی ارائه‌شده مد نظر قرار گرفته است. معادله‌ی (۲) تضمین می‌کند که ولتاژ در بازه‌ی قابل قبول باقی بماند. همچنین محدوده‌ی جریان فیدرها توسط معادله‌ی (۳) مد نظر قرار گرفته است.

$$V_{\min}(n) \leq v(n, t) \leq V_{\max}(n) \quad \forall n, t \quad (2)$$

$$I(m, n, t) \leq I_{\max}(m, n) \quad \forall m, n, t \quad (3)$$

که V_{\min} و V_{\max} و v به ترتیب کمینه، بیشینه و مقدار ساعتی ولتاژ باس ها می باشند. همچنین I_{\max} و I به ترتیب بیشینه جریان قابل تحمل و مقدار ساعتی جریان فیدر بین باس های m و n می باشد.

[۲] قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو

عملکرد قابل اطمینان شبکه‌های توزیع نیازمند تعادل مداوم بین توان تولید شده و بار مورد تقاضا می‌باشد. به همین منظور قیود (۴) و (۵) جهت ایجاد تعادل بین توان اکتیو و راکتیو شبکه‌ی توزیع با بار مورد تقاضای شبکه در هر باس n و در هر ساعت t

داده شده است. اطلاعات مربوط به شبکه‌ی نمونه در بخش ۴ ارائه شده است. نتایج آماری و نمودارهای مربوط به دستاوردهای مسئله در بخش ۵ ارائه شده است. یک جمع‌بندی از کار انجام شده در انتهای مقاله ارائه شده است.

۲. مدلسازی ریاضی

در این بخش یک فرمولاسیون ریاضی کامل از برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع هوشمند شامل تابع هدف و قیود مسئله ارائه شده است. همچنین مدلسازی مربوط به منابع تولید تجدیدپذیر شامل توربین‌های بادی، برنامه‌های پاسخگویی بار، سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی و شبکه‌ی توزیع در این بخش ارائه شده است.

۲.۱. تابع هدف

برنامه‌ریزی انرژی و رزرو مورد نیاز شبکه‌های توزیع توسط اپراتور مستقل سیستم و با هدف کمینه کردن هزینه‌های عملکرد این شبکه در طول بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته صورت می‌گیرد.

$$\begin{aligned} \text{Min} : & \sum_{t=1}^{24} \{P_{grid}(t) \times p_g^E(t)\} \\ & + \sum_{j=1}^{NDG} \{CE_{DG}(j, t) + CS_{DG}(j, t) + CR_{DG}(j, t)\} \\ & + \sum_{d=1}^{NDRP} \{CE_{DRP}(d, t) + CR_{DRP}(d, t)\} \\ & + \sum_{i=1}^{NIL} \{CE_{IL}(i, t) + CR_{IL}(i, t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

تابع هدف ارائه شده شامل ۴ قسمت است. قسمت اول هزینه‌های مربوط به تامین توان و مبادله با شبکه‌ی بالادست می‌باشد که به صورت حاصلضرب توان ساعتی خریداری شده از شبکه بالادست (P_{grid}) در قیمت ساعتی توان شبکه بالادست (p_g^E) مدل شده است. قسمت دوم مربوط به هزینه‌های واحدهای DG شامل هزینه‌ی عملکرد (CE_{DG})، هزینه‌ی شروع به کار (CS_{DG}) و هزینه‌ی رزرو تامین شده توسط این واحدها (CR_{DG}) است که در ادامه به ترتیب توسط معادلات (۶) و (۷) و (۹) معرفی

در نظر گرفته شده است [۱۸].

می‌شود.

$$CR_{DG}(j,t) = 0.2 \quad \forall j,t \quad (9)$$

$$\times (b_j + 2 \times c_j \times P_{DG}^{\max}(j,t))$$

قیود (۱۰) و (۱۱) تضمین می‌کند که نقطه‌ی عملکرد واحد DG شامل توان تولیدی و رزرو تامین شده، محدودیت‌های فنی شامل کمینه و بیشینه‌ی توان تولیدی را مد نظر قرار می‌دهد.

$$P_{DG}^{\min}(j) \times u(j,t) \leq P_{DG}(j,t) \leq P_{DG}^{\max}(j) \times u(j,t) \quad \forall j,t \quad (10)$$

$$P_{DG}(j,t) + R_{DG}(j,t) \leq P_{DG}^{\max}(j) \times u(j,t) \quad \forall j,t \quad (11)$$

میزان افزایش و یا کاهش توان تولیدی توسط واحدهای DG در طول هر واحد زمانی از یک مقدار مشخص نمی‌تواند بیشتر باشد. معادلات (۱۲) و (۱۳) نرخ افزایش و کاهش تولید واحد DG را محدود می‌کند.

$$P_{DG}(j,t) - P_{DG}(j,t-1) \leq UR(j) \times (1 - y(j,t)) + P_{DG}^{\min}(j) \times y(j,t) \quad \forall j,t \quad (12)$$

$$P_{DG}(j,t-1) - P_{DG}(j,t) \leq DR(j) \times (1 - z(j,t)) + P_{DG}^{\min}(j) \times z(j,t) \quad \forall j,t \quad (13)$$

هر واحد DG بعد از روشن شدن باید به مدت چند ساعت روشن بماند. همچنین هر واحد DG بعد از خاموش شدن باید مدت زمان مشخصی خاموش بماند. قیود (۱۴) و (۱۵) مربوط به کمینه زمان روشن بودن و خاموش بودن واحدهای DG است.

$$\sum_{h=t}^{t+UT(j)-1} u(j,h) \geq UT(j) \times y(j,t) \quad \forall j,t \quad (14)$$

$$\sum_{h=t}^{t+DT(j)-1} (1 - u(j,h)) \geq DT(j) \times z(j,t) \quad \forall j,t \quad (15)$$

[۴] مدل سازی توربین بادی

$$P_L(n,t) - \sum_{j \in n} P_{DG}(j,t) - \sum_{w \in n} P_W(w,t) - \sum_{b \in n} (\eta^d \times P_{Bd}(b,t) - \eta^c \times P_{Bc}(b,t)) = P^f(n,m,t) - r(n,m) \times I(n,m,t)^2 - \sum_{k \in (n,k)} P^f(n,k,t); \forall m,n,t \quad (4)$$

$$Q_L(n,t) - \sum_{j \in n} Q_{DG}(j,t) - \sum_{w \in n} Q_W(w,t) - \sum_{b \in n} (\eta^d \times Q_{Bd}(b,t) - \eta^c \times Q_{Bc}(b,t)) = Q^f(n,m,t) - x(n,m) \times I(n,m,t)^2 - \sum_{k \in (n,k)} Q^f(n,k,t); \forall m,n,t \quad (5)$$

که P_L و Q_L توان اکتیو و راکتیو ساعتی بار هر باس، P_{DG} و Q_{DG} توان اکتیو و راکتیو ساعتی هر واحد DG، P_W و Q_W توان اکتیو و راکتیو تولیدی هر توربین بادی، P_{Bd} و Q_{Bd} توان اکتیو و راکتیو شارژ شده توسط پیل سستیم ذخیره انرژی هیدروژنی می‌باشد.

[۳] قیود واحدهای DG

در این قسمت قیود مربوط به عملکرد واحدهای DG به طور کامل آورده شده است [۱۹]. هزینه‌ی عملکرد واحدهای DG غیر تجدیدپذیر بصورت تابعی از توان تولیدی آن مطابق معادله‌ی (۶) مدل می‌شود.

$$CE_{DG}(j,t) = a_j \times u(j,t) + b_j \times P_{DG}(j,t) + C_j \times P_{DG}^2(j,t) \quad \forall j,t \quad (6)$$

هزینه‌ی شروع به کار واحد DG توسط معادله‌ی (۷) مدل شده است.

$$CS_{DG}(j,t) = SUC(j) \times (u(j,t) - u(j,t-1)); \forall j,t \quad (7)$$

$$CS_{DG}(j,t) \geq 0; \forall j,t \quad (8)$$

هزینه‌ی رزرو به صورت ۲۰ درصد بیشینه‌ی هزینه‌ی حدی تولید واحد DG در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه‌ی رزرو برنامه‌ریزی شده‌ی واحد DG توسط معادله‌ی (۹) محاسبه

هیدروژن و پیل سوختی می‌باشد. در ساعات‌های غیرپیک که قیمت شبکه بالادست پایین است انرژی مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن از شبکه‌ی بالادست تامین می‌شود. هیدروژن تولید شده در درون تانکر هیدروژن ذخیره می‌شود و بعداً در ساعات‌های پیک که قیمت برق بالاست توسط پیل سوختی به برق تبدیل می‌شود. قیود فنی سیستم ذخیره هیدروژن توسط معادلات (۱۷) تا (۲۹) ارائه شده است.

قیود (۱۷) و (۱۸) کمینه و بیشینه توان مصرفی توسط الکترولایزر را محدود می‌کند. همچنین بیشینه هیدروژن تولیدی توسط معادله (۱۹) محدود می‌شود. معادله (۲۰) هیدروژن تولید شده را به صورت تابعی از توان مصرفی الکترولایزر نشان می‌دهد.

$$P_{t,s}^{EL} \leq P_{\max}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (17)$$

$$P_{t,s}^{EL} \geq P_{\min}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (18)$$

$$N_{H2,t,s}^{EL} \leq N_{H2,\max}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (19)$$

$$N_{H2,t,s}^{EL} = \frac{\eta^{EL} P_{t,s}^{EL}}{LHV_{H2}} \quad (20)$$

مقدار اولیه‌ی فشار تانک هیدروژن و مقادیر بیشینه و کمینه آن به ترتیب توسط معادلات (۲۱) تا (۲۳) نشان داده شده است.

$$P_{t0}^{H2} = P_{\text{initial}}^{H2} \quad (21)$$

$$P_{t,s}^{H2} \leq P_{\max}^{H2} \quad (22)$$

$$P_{t,s}^{H2} \geq P_{\min}^{H2} \quad (23)$$

در حالت پیل سوختی هیدروژن ذخیره شده در تانک هیدروژن صرف تولید توان در ساعات‌های پیک می‌شود. معادله (۲۴) ماکزیمم هیدروژن مصرفی پیل سوختی را محدود می‌کند. معادله (۲۵) نشان می‌دهد که هیدروژن مصرفی پیل سوختی تابعی از توان تولیدی آن است. کمینه و بیشینه توان تولیدی پیل سوختی توسط معادلات (۲۶) و (۲۷) تعیین می‌شود.

پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی منجر به کاهش هزینه‌ی تولید انرژی توسط مولدهای بادی شده است و این تکنولوژی قابلیت رقابت با سایر انرژی‌ها را یافته است. معادله (۱۶) میزان توان تولیدی توسط توربین بادی را بسته به سرعت‌های مختلف باد محاسبه می‌کند [۲۱].

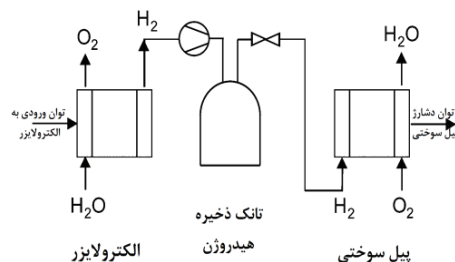
$$P_w(v) = \begin{cases} P_r \times \frac{(v-v_{ci})}{(v_r-v_{ci})} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

در این معادله V سرعت لحظه‌ای باد، V_{ci} سرعت cut-in، V_{co} سرعت cut-out و V_r سرعت rated توربین بادی است.

- سرعت cut-in: حداقل سرعت باد که بعد از آن توربین بادی شروع به تولید برق می‌کند.
- سرعت cut-out: حداکثر سرعتی که بعد از آن برای حفاظت ایمنی توربین و جلوگیری از واژگونی آن حرکت توربین متوقف می‌شود.
- سرعت rated: متوسط سرعت باد که اگر با آن سرعت باد به توربین بوزد، توان تولید شده توان نامی توربین خواهد بود.

۲.۳. مدل‌سازی سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

فرض شده است که وظیفه کنترل سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی برعهده DNO است تا به این وسیله انعطاف پذیری بیشتری در تامین انرژی مورد نیاز شبکه داشته باشیم.



شکل ۱: سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

این سیستم شامل بخش‌های الکترولایزر، تانکر ذخیره‌کننده

مقدار کاهش بار پذیرفته نشده توسط DRP ها می‌تواند بعنوان رزرو مورد استفاده قرار گیرد. طبق معادله‌ی (۳۴) مقدار انرژی و رزرو برنامه‌ریزی شده از طریق کاهش بار باید به حداکثر پیشنهاد DRP محدود شود. هزینه‌ی مربوط به ظرفیت رزرو از طریق معادله‌ی (۳۵) محاسبه می‌شود.

$$P_{DRP}(d, t) + R_{DRP}(d, t) \leq P_{DRP}^{\max}(d, t) \quad (34)$$

$$CR_{DRP}(d, t) = R_{DRP}(d, t) \times KR_{DRP}(d, t) \quad (35)$$

همچنین بارهای انفرادی بزرگ مانند بارهای صنعتی (ILs) می‌توانند در برنامه‌ریزی انرژی و رزرو شبکه‌های توزیع شرکت کنند. محدوده‌ی برنامه‌ریزی تامین توان و رزرو از طریق IL ها از معادله‌ی (۳۶) و هزینه مربوط به انرژی و رزرو از معادله‌های (۳۷) و (۳۸) بدست می‌آید.

$$P_{IL}(i, t) + R_{IL}(i, t) \leq P_{IL}^{\max}(i, t) \quad (36)$$

$$CE_{IL}(i, t) = P_{IL}(i, t) \times KE_{IL}(i, t) \quad (37)$$

$$CR_{IL}(i, t) = P_{IL}^R(i, t) \times KR_{IL}(i, t) \quad (38)$$

۳. روش ارائه شده

روش مقاوم یک روش جدید برای بهینه‌سازی مسائلی است که با عدم قطعیت مربوط به پارامترهای ورودی مواجه هستند. این روش بویژه برای مسائلی مناسب است که اطلاعات کاملی از ماهیت عدم قطعیت در دست نیست. ایده‌ی اولیه در بهینه‌سازی مقاوم، در نظر گرفتن بدترین سناریوی ممکن و بهینه‌سازی بر اساس بدترین سناریو است. به عنوان مثال فرض می‌شود که ممکن است ضرایب یکی از قیود مسئله تغییر کند. در بهینه‌سازی مقاوم، بدترین حالتی که ممکن است برای آن محدودیت با توجه به تغییر ضرایب پیش بیاید در نظر گرفته شده و طبق آن بهینه‌سازی انجام می‌شود در نتیجه تصمیمات گرفته شده در بدترین حالت عدم قطعیت پارامترها بهینه باقی می‌ماند.

۳.۱. روش بهینه‌سازی مقاوم

تابعی بصورت $z = f(X, y)$ را در نظر بگیرید که در X خطی و در y غیر خطی است. مقادیر X دارای عدم قطعیت و مقادیر y معلوم است. در بهینه‌سازی مقاوم فرض شده است که تابع توزیع احتمال خاصی از متغیر X در دست نیست. عدم

$$N_{H2,t,s}^{FC} \leq N_{H2,max}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (24)$$

$$N_{H2,t,s}^{FC} = \frac{P_{t,s}^{FC}}{\eta^{FC} LHV_{H2}} \quad (25)$$

$$P_{t,s}^{FC} \leq P_{max}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (26)$$

$$P_{t,s}^{FC} \geq P_{min}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (27)$$

باید توجه شود که در سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی، الکترولیزر و پیل سوختی نمی‌توانند بطور همزمان کار کنند. عبارت دیگر این سیستم باید در هر زمان در یکی از حالت‌های مصرف توان توسط الکترولیزر (شارژ) و یا تولید توان توسط پیل سوختی (دشارژ) باشد که توسط متغیرهای باینری معادله (۲۸) مدل شده است. در انتها، سطح فشار هر ساعت سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی توسط معادله (۲۹) تعیین می‌شود.

$$U_{t,s}^{EL} + U_{t,s}^{FC} \leq 1 \quad (28)$$

$$P_{t,s}^{H2} = P_{t-1,s}^{H2} + \frac{\mathcal{R}T_{H2}}{V_{H2}} (N_{H2,t,s}^{EL} - N_{H2,t,s}^{FC}) \quad (29)$$

۲.۴. مدل سازی برنامه‌های پاسخگویی بار

برنامه‌های پاسخگویی بار به تعریف کمیته‌ی فدرال قانون گذاری انرژی آمریکا (FERC) به برنامه‌هایی اطلاق می‌شود که تغییر قیمت انرژی منجر به تغییر میزان و یا نحوه‌ی مصرف مشترکین و انتقال این مصرف از ساعت‌های پیک (قیمت بالا) به ساعت‌های غیر پیک (قیمت پایین) می‌شود [۷]. در این مقاله DRP ها با هدف ایجاد امکان مشارکت برای مصرف کنندگان کوچک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شرکت‌های DRP امکان مشارکت مشتریان را بررسی می‌کنند و بعد از جمع و یکپارچه کردن پاسخ‌های مشترکین امکان ارتباط این مصرف کنندگان را با بازار عمده فروشی فراهم می‌کنند. هزینه‌ی مربوط به قراردادهای منعقد شده بین DRP ها و مشتریان توسط معادلات (۳۰) تا (۳۳) مدل‌سازی شده است.

$$O_{min}^d \leq o_1^d \leq O_1^d \quad (30)$$

$$0 \leq o_k^d \leq (O_{k+1}^d - O_k^d) \forall k = 2, 3, \dots, k \quad (31)$$

$$P_{DRP}^{DA}(d, t) = \sum_k o_k^d \quad (32)$$

$$CE_{DRP}(d, t) = \sum_k \pi_k^d \times o_k^d \quad (33)$$

بر مبنای معادله (۴۳) دو مسئله بهینه‌سازی تودرتو باید حل شود. معادله (۴۴) بر مبنای w_i خطی است و فرم دوگان آن به صورت زیر است:

$$\min \left[\Gamma\beta + \sum_i \xi_i \right] \quad (45)$$

$$\beta + \xi_i \geq a_i(y) * \hat{x}_i$$

با جایگذاری (۴۵) در (۴۴) داریم:

$$\max_{y, \beta, \xi_i} z \quad (46)$$

$$z \leq f(X, y) \quad (47)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f(X, y) = A(y) * \bar{X} + g(y) - \Gamma\beta - \sum_i \xi_i \\ \beta + \xi_i \geq A(y) * \bar{X}_i \end{array} \right. \quad (48)$$

۴. شبکه مورد مطالعه و داده‌های ورودی مسئله

در این مقاله یک شبکه‌ی ۳۳ باسه‌ی استاندارد IEEE به منظور بررسی اثر بخشی روش ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از [۲۳]، واحدهای DG به باس‌های مناسب متصل شده‌اند. سه توربین بادی در این شبکه مورد استفاده قرار گرفته که به باس‌های ۱۳، ۱۵ و ۳۰ متصل شده‌اند. اطلاعات مربوط به توربین‌های بادی مورد استفاده از [۲۴] گرفته شده است. توان نامی این توربین‌های بادی برابر ۳ مگاوات و سرعت cut-in، cut-out و rated این توربین‌ها به ترتیب برابر ۳، ۲۵ و ۱۳ متر بر ثانیه می‌باشد. پیشبینی سرعت باد در طول ۲۴ ساعت پیش‌رو در شکل ۲ آورده شده است [۲۵]

قطعیت $X \in U(X)$ توسط یک بازه‌ی $X \in U(X)$ مدل می‌شود که X مقادیر خود را از بازه‌ی $U(X)$ می‌گیرد. کمینه کردن $z = f(X, y)$ توسط معادلات (۳۹) تا (۴۱) فرموله می‌شود.

$$\max_y z = f(X, y) ; X \in U(X) \quad (39)$$

با توجه به خطی بودن z نسبت به X معادله بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\max_y z \quad (40)$$

$$s.t \left\{ \begin{array}{l} z \leq f(\hat{X}, y) \\ h(\hat{X}, y) = A(y) * \hat{X} + g(y) \\ \hat{X} \in U(X) = \left\{ X \mid |X - \bar{X}| \leq \hat{X} \right\} \end{array} \right. \quad (41)$$

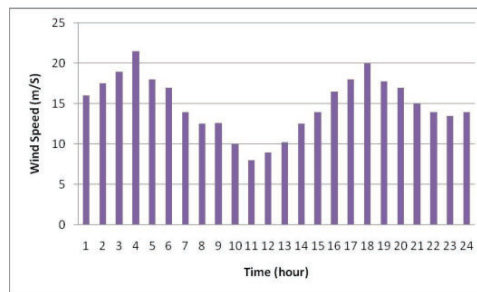
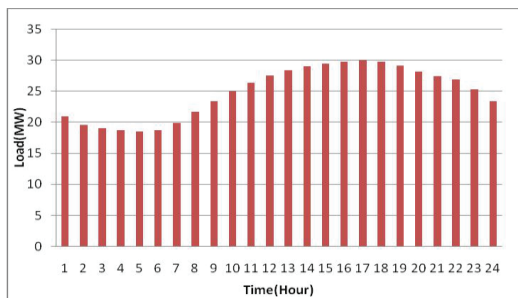
که $\hat{X}, \bar{X}, \vec{X}$ به ترتیب مقدار غیرقطعی، مقدار پیشبینی شده و ماکزیمم مقدار تغییرات متغیر X از \bar{X} می‌باشد. روش بهینه سازی مقاوم نه تنها راه حلی را جست و جو می‌کند که تابع هدف مسئله را برقرار کند بلکه تضمین می‌کند که در صورت وجود خطا در مقادیر پیش بینی شده‌ی متغیر X تابع هدف با یک احتمال بسیار بالایی بهینه باقی می‌ماند. به همین منظور یک همتای مقاوم از مسئله ساخته و حل شده است. همتای مقاوم (۴۰) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\max_y z \quad (42)$$

$$z \leq f(X, y) \quad (43)$$

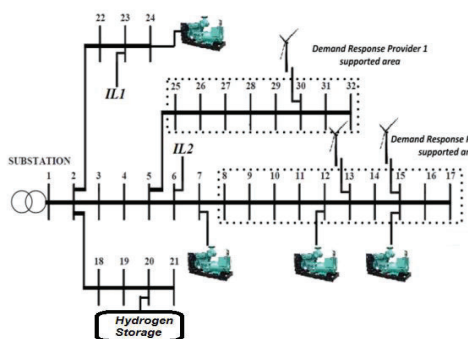
$$\quad (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i w_i \leq \Gamma \\ 0 \leq w_i \leq 1 \\ f(X, y) = A(y) * \bar{X} + g(y) - \max_{w_i} \sum_i a_i(y) * \bar{X}_i * w_i \end{array} \right.$$



شکل ۲: سرعت باد پیشبینی شده برای ۲۴ ساعت پیش‌رو

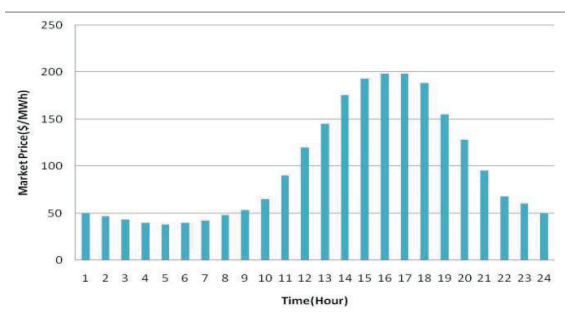
شکل ۳: بار ساعتی پیشبینی شده برای ۲۴ ساعت پیش‌رو



شکل ۴: شبکه ۳۳ باسه مورد مطالعه

همچنین در شبکه‌ی نمونه‌ی ارائه شده چهار دیزل ژنراتور موجود می‌باشد که به باس‌های ۷، ۱۲، ۱۵ و ۲۴ متصل شده‌اند. ضرایب مربوط به هزینه‌ی عملکرد این ژنراتورها و اطلاعات مربوط به توان بیشینه و کمینه، نرخ افزایش و کاهش توان و کمینه زمان روشن و خاموش بودن در جداول ۱ و ۲ آورده شده است [۲۶]. همچنین پیشبینی بار ساعتی در طول ۲۴ ساعت پیش‌رو در شکل ۳ آورده شده است [۲۷] همچنین شبکه‌ی ۳۳ باسه مورد مطالعه در شکل ۴ آمده است [۲۸].

همچنین پیشبینی ساعتی قیمت برق بازار عمده فروشی برای ۲۴ ساعت پیش‌رو طبق شکل ۵ فرض شده است.



شکل ۵: قیمت پیشبینی شده‌ی شبکه بالادست در ۲۴ ساعت پیش‌رو

اطلاعات مربوط به سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی هیدروژنی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ضرایب هزینه ژنراتورها

واحد	ضرایب هزینه		
	a_i (\$)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/MWh ²)
DG1	۲۷	۸۷	۰.۰۰۲۵
DG2	۲۵	۸۷	۰.۰۰۳۵
DG3	۲۸	۹۲	۰.۰۰۳۵
DG4	۲۶	۸۱	۰.۰۱۸۴

جدول ۲: اطلاعات مربوط به داده‌های فنی دیزل ژنراتورها

واحد	داده‌های فنی				
	SUT (\$)	MUT/MDT (h)	RU/RD (MW/h)	Pmax (MW)	Pmin (MW)
DG1	۱۵	۲	۱.۸	۳.۵	۱
DG2	۲۵	۱	۱.۵	۳	۰.۷۵
DG3	۲۸	۱	۱.۵	۳	۰.۷۵
DG4	۲۶	۲	۱.۸	۴.۱	۱

جدول ۳: اطلاعات سیستم ذخیره کننده انرژی

واحد	مقادیر	پارامترها
Bar	۱۳,۸, ۰, ۲	$P_{max}^{H2}, P_{min}^{H2}$
Bar	۱۰, ۱۰	$P_{initial}^{H2}, P_{f0}^{H2}$
MW	۰, ۰, ۵ ۲, ۵	$P_{max}^{EL}, P_{min}^{EL}$
Nm ^۳ /h	۰, ۳, ۹ ۱, ۰, ۵	$N_{H2,max}^{EL}, N_{H2,max}^{FC}$
%	۵۵, ۴۵	η^{EL}, η^{FC}
No.	۰, ۳۰۰ ۳۰۰	N^{FC}, N^{EL}
MW	۰, ۰, ۵ ۲, ۵	$P_{max}^{FC}, P_{min}^{FC}$
MJ/Kmol	۲۴۰	LHV_{H2}
J/Kmol	۸,۳۱۴	R
K	۳۱۳	T_{H2}
m ^۳	۴	V_{H2}

نتایج حاصل از شبیه سازی مسئله

مدل ارائه شده یک برنامه ریزی بهینه برای انرژی و رزرو منابع تولید پراکنده موجود در شبکه‌ی توزیع و برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه می‌دهد.

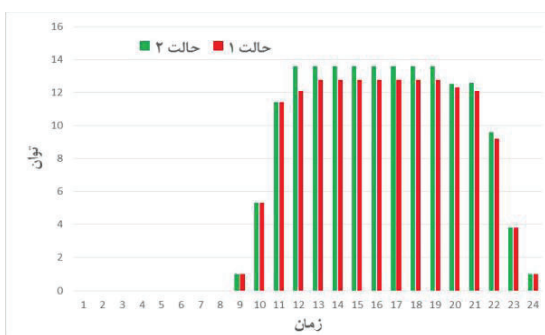
- حالت اول (عدم حضور سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی):

با توجه به نتایج بدست آمده، در ساعت‌هایی که قیمت انرژی شبکه بالادست بیشتر از هزینه‌ی واحدهای DG است این واحدها شروع به تولید انرژی می‌کنند و میزان خرید توان از شبکه بالادست کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این نکته که توربین‌های بادی بدون هزینه در نظر گرفته شده‌اند با در نظر گرفتن شرایط باد، همواره در حداکثر توان قابل تولید خود کار می‌کنند. همچنین، برنامه‌های پاسخگویی بار نیز در ساعت‌هایی که قیمت برق خریداری شده بالاست به منظور کاهش خرید برق و در نتیجه کاهش هزینه‌های شبکه وارد مدار می‌شوند. همچنین در این حالت رزرو مورد نیاز شبکه از طریق واحدهای DG، برنامه‌های پاسخگویی بار تامین می‌شود در نتیجه در بعضی ساعت‌ها که قیمت شبکه بالاتر از واحد‌های DG است و این واحدها می‌توانند با فروش برق به مصرف‌کنندگان و کاهش خرید از شبکه‌ی بالادست هزینه‌های شبکه را کاهش دهند به

دلیل تامین رزرو مورد نیاز شبکه این فرصت را از دست می‌دهند.

- حالت دوم (در حضور سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی):

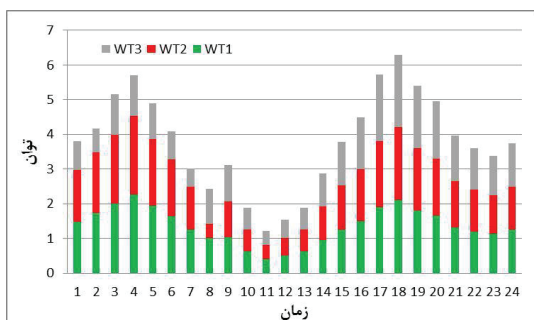
در حالت حضور سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی، این سیستم در ساعت‌هایی که قیمت برق شبکه بالادست پایین است شروع به ذخیره انرژی می‌کند و در ساعت‌هایی که قیمت شبکه بالادست بالاست انرژی ذخیره شده را به شبکه باز می‌فرستد و در نتیجه توان خریداری از شبکه بالادست کاهش می‌یابد که منجر به کاهش هزینه می‌شود. همچنین حضور این سیستم و شرکت آن در تامین رزرو مورد نیاز شبکه منجر به آزاد شدن ظرفیت واحد‌های DG و در نتیجه ایجاد امکان شرکت این واحدها در تامین انرژی مورد نیاز شبکه می‌شود که این مورد نیز هزینه‌های عملکردی شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه را کاهش می‌دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که قسمتی از ظرفیت واحد‌های DG که مربوط به تامین رزرو بود آزاد شده و این واحدها در ساعات پیک توان بیشتری تولید می‌کنند.



شکل ۶: برنامه‌ریزی انرژی واحدهای دیزل ژنراتور

همچنین در شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که با حضور سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی در ساعت‌های ۳ و ۴ و ۵ نیمه شب که مصرف توان بسیار پایین است و به تبع آن قیمت شبکه بالادست پایین است سیستم ذخیره کننده انرژی شارژ می‌شود و در ساعت‌های اولیه صبح یعنی ۷ و ۸ و ۹ که با آغاز فعالیت ادارات و مدارس و صنایع مصرف افزایش می‌یابد توان ذخیره

هیدروژنی هزینه‌های عملکرد شبکه‌ی توزیع را کاهش داده است.



شکل ۹: برنامه ریزی توان تولید شده در توربین بادی

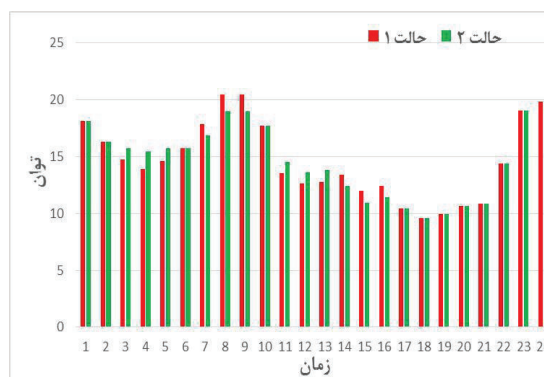
جدول ۴: هزینه‌ی عملکرد شبکه در دو حالت در نظر گرفته شده

حالت	هزینه‌ی شبکه
حالت ۱ (بدون سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی)	۶۵۴۷۸ دلار
حالت ۲ (با سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی)	۵۸۷۴۵ دلار

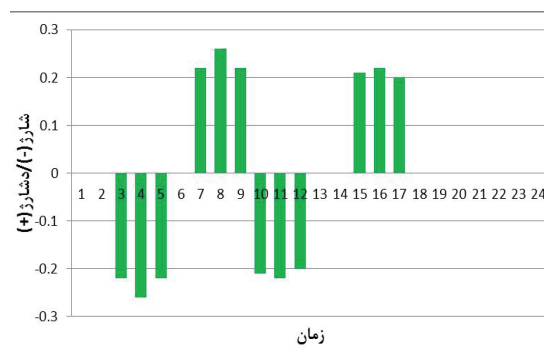
۵. جمع بندی

برنامه‌ریزی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله تاثیر کاربرد سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی هیدروژنی در کنار حضور منابع تولیدپراکنده‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار بر عملکرد بهینه‌ی شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک شبکه‌ی ۳۳ باسه‌ی بهبود یافته‌ی IEEE به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهاد شده مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین یک روش بهینه سازی مقاوم به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های باد و بار در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است که تضمین می‌کند نتایج بدست آمده برای برنامه ریزی شبکه توزیع در برابر بدترین شرایط عدم قطعیت بهینه باقی بماند. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در ساعت‌هایی که قیمت بازار عمده فروشی بالاست خرید از این بازار کاهش می‌یابد و سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی هیدروژنی، منابع تولید پراکنده و برنامه‌های پاسخگویی بار برق مورد نیاز

شده د شارژ می‌شود تا توان خریداری شده از شبکه بالادست کاهش بیابد. همچنین در ادامه‌ی طول روز در ساعت‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی شروع به شارژ می‌کند تا در ساعت‌های پیک مصرف برق یعنی ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ با دشارژ انرژی خرید از شبکه بالادست را کاهش دهد و به این صورت هزینه‌های شبکه را کاهش دهد.



شکل ۷: توان خریداری شده از شبکه بالادست



شکل ۸: برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

با توجه به این نکته که در برنامه ریزی کوتاه مدت شبکه‌های برق توربین‌های بادی بدون هزینه در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه مطابق شکل ۹ در هر دو حالت در نظر گرفته شده در مسئله توربین‌های بادی با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کنند. هزینه‌ی راه اندازی شبکه برای دو حالت در نظر گرفته شده برای شبکه در جدول ۴ آمده است. مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن سیستم ذخیره انرژی



- security-constrained scheduling in smart distribution systems." *Applied energy* 96 (2012): 281-291.
- [10] Alipour, Manijeh, Kazem Zare, and Behnam Mohammadi-Ivatloo. "Short-term scheduling of combined heat and power generation units in the presence of demand response programs." *Energy* 71 (2014): 289-301.
- [11] Algarni A.A.S, Bhattacharya K. A generic operations framework for Discos in retail electricity markets. *IEEE Trans. Power Syst.* 2009; 24(1): 356 -367.
- [12] Cecati C, Citro C, Siano P. Smart operation of wind turbines and diesel generators according to economic criteria. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011; 58(10):4514 -4525.
- [13] Chakraborty S, Ito T, Senjyu T, Saber A.Y. Intelligent economic operation of smart-grid facilitating fuzzy advanced quantum evolutionary method. *IEEE Trans. Sustainable Energy* 589 2013; 4(4):905-916.
- [14] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 2014; 63:218-225.
- [15] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A stochastic framework for short-term 597 operation of a distribution company. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013; 28(4):4712-4721.
- [16] Nojavan, Sayyad, Mehdi Jalali, and Kazem Zare. "Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach." *Electric Power Systems Research* 107 (2014): 119-124.
- [17] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs." *Electric Power Systems Research* 111 (2014): 156-168.
- [18] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multi-objective mathematical programming approach. *Int. J. Energy Convers. Manage.* 2014; 78:151-164. 601
- [19] Tan Y, Cao Y, Li C, Li Y, Zhou J, Song Y. A Two-Stage Stochastic Programming Approach Considering Risk Level for Distribution Networks Operation with Wind Power. *IEEE Systems Journal* 2014; to be published.
- شبکه را تامین می‌کنند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مدل ارائه شده قابلیت برنامه‌ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه‌های توزیع را دارا می‌باشد. بعلاوه مشاهده می‌شود که کاربرد سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی هیدروژنی هزینه‌ی عملکرد شبکه را کاهش می‌دهد.

منابع

- [1] Saber, Ahmed Yousuf, and Ganesh Kumar Venayagamoorthy. "Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.4 (2011): 1229-1238.
- [2] Zhang, Ning, et al. "Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7.1 (2016): 420-427.
- [3] Milligan, Michael, et al. "Alternatives No More: Wind and Solar Power Are Mainstays of a Clean, Reliable, Affordable Grid." *IEEE Power and Energy Magazine* 13.6 (2015): 78-87.
- [4] Wandhare, Rupesh G., and Vivek Agarwal. "Novel integration of a PV-wind energy system with enhanced efficiency." *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.7 (2015): 3638-3649.
- [5] Liu, Cong, et al. "Fuzzy Energy and Reserve Co-optimization with High Penetration of Renewable Energy." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*(2016).
- [6] Alipour, Manijeh, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "Stochastic risk-constrained short-term scheduling of industrial cogeneration systems in the presence of demand response programs." *Applied Energy* 136 (2014): 393-404.
- [7] Nojavan, Sayyad, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimisation approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties." *IET Generation, Transmission & Distribution* 9.4 (2015): 328-338.
- [8] Borghetti, Alberto, et al. "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources." *IEEE Systems Journal* 4.3 (2010): 313-322.
- [9] Ghazvini, MA Fotouhi, Hugo Morais, and Zita Vale. "Coordination between mid-term maintenance outage decisions and short-term



- [20] Baran, Mesut E., and Felix F. Wu. "Optimal capacitor placement on radial distribution systems." IEEE Transactions on power Delivery 4.1 (1989): 725-734.
- [21] Nojavan, Sayyad, and Habib Allah Aalami. "Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program." Energy Conversion and Management 103 (2015): 1008-1018.
- [22] Chen, S. X., Hoay Beng Gooi, and MingQiang Wang. "Sizing of energy storage for microgrids." IEEE Transactions on Smart Grid 3.1 (2012): 142-151.
- [23] Wong, S., K. Bhattacharya, and J. D. Fuller. "Electric power distribution system design and planning in a deregulated environment." IET generation, transmission & distribution 3.12 (2009): 1061.
- [24] Atwa, Y. M., et al. "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization." IEEE Transactions on Power Systems 25.1 (2010): 360-370.
- [25] Willy Online Pty Ltd, online available at: <<http://wind.willyweather.com.au/>>.
- [26] Diesel generators specification sheets, Kohler Power Systems Company, online available at: <<http://www.yestramski.com/industrial/generatorsdiesel/industrial-diesel-generators-all.htm>>.
- [27] (2013, July. 18). New York Independent System Operator, online available at: http://www.nyiso.com/public/markets_operations/index.jsp.
- [28] Ramos, Esther Romero, et al. "Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction." IEEE Transactions on power systems 20.2 (2005): 556-564.