ششمین همایش بین‌المللی افق های نویـن در
مهندسی برق، کامپیوتـر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mhconf.ir

مدیریت تولید سیستم فوتوولتاییک با هماهنگی واحد های ذخیره ساز در بازار برق

امین رنجبران (نویسنده مسئول)۱، محمد رحمانی ۲

۱ دکتر امین رنجبران، گناباد، amranjbaran@ gmail.com
۲ محمد رحمانی، قائنات، Mohammad_r1370@yahoo.com

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی تکنولوژی تولید تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی، سلول‌های فتوولتاییک، سلول‌های سوختی و میکروتوربین‌ها، توجه نهادهای تولید و توزیع را به تغییر در استراتژی‌های خود با توسعه‌ی تولیدات پراکنده در سیستم‌های قدرت سوق داده است. امروزه افزایش شدید مصرف انرژی، قابلیت استفاده از منابع طبیعی در دسترس، هزینه‌ها و آلایندگی سوخت‌های فسیلی تمایل بالایی را به منابع تجدید پذیر جلب کرده است. خورشید یکی از مهم‌ترین منابع تجدید پذیر هستند. علی‌رغم ویژگی‌های جذاب این منابع وجود عدم قطعیت در تولیدات خورشیدی، استفاده از آن‌ها را محدود کرده است.پیش¬بینی رفتار لحظه¬ای این منابع به‌واسطه ماهیت وابسته به شرایط جوی، غیرممکن است. ازآنجاکه ذخیره توان تولیدی خورشیدی ممکن نیست، بایستی از منابع تولیدی دیگر برای ایجاد توازن بین تولید، بار و تلفات استفاده کرد. هیدرو پمپ‌ها ازجمله ذخیره¬سازهای انرژی هستند که می¬توانند به¬عنوان پشتیبان با منابع تجدیدپذیر برای ایجاد این توازن تلفیق شوند. در این پایان‌نامه مدیریت ریسک بهینهٔ تولید خورشیدی و هماهنگی بهینه آ¬ن¬ها با واحدهای تلمبه ذخیره¬ای برای ذخیرهٔ بهینهٔ انرژی باهدف بیشینه¬سازی سود در بازار روز بعد موردنظر می‌باشد. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از داده¬های آماری میزان تابش نور خورشید، پیش¬بینی توان خورشیدی برای بازه¬های زمانی یک‌ساعته با افق روز آینده انجام خواهیم داد. بر مبنای پیش¬بینی¬های انجام‌شده و با رعایت قیود فنی نیروگاه خورشیدی و هیدرو پمپ به بهره¬برداری بهینه خواهیم پرداخت. این برنامه¬ریزی تعیین تحویل مستقیم توان خورشیدی به شبکه، مقدار ذخیره¬سازی و مقدار توان تولیدی واحد هیدرو را در هر ساعت شامل می¬شود؛ بهینه‌سازی فوق‌الذکر باهدف تأمین بیشترین سود در سایهٔ رسیدن به قابلیت اطمینان و ریسک‌پذیری مناسب سیستم دست‌یافتنی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی

واحد خورشید- ذخیره¬ساز، برنامه¬ریزی خطی، پیش¬بینی تابش خورشید.

۱. متن مقاله

۱-۱-بیان مساله

اگر چه هنوز در اکثر نقاط جهان سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی به‌عنوان مهم‌ترین روش تولید انرژی الکتریکی مطرح می‌باشد، در مهروموم‌های اخیر به دلیل مشکلات زیست‌محیطی از یک‌سو و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی در دسترس از سوی دیگر، بشر به دنبال روش-های جایگزین برای تأمین توان الکتریکی موردنیاز خود می‌باشد [۱]. در این بین استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بیش از پیش مورد توجه جوامع علمی و تحقیقاتی بوده است. تولیدات پنل‌های خورشیدی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تجدید پذیر انرژی، در سیستمهای قدرت امروزی برای تولید برق، در حال افزایش است [۲]. این نوع تولید توان به دلیل تابش متغیر خورشید، توان خروجی متغیر و نامعین داشته و به همین دلیل از جنبه‌های مختلفی بر سیستم قدرت تأثیرگذار است. با توجه به رقابتی شدن بازار برق و هزینه‌های بالای قطع برق، قابلیت اعتماد و ریسک‌پذیری سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است [۳]. بنابراین مدیریت سیستم برای تأمین توان اقتصادی و باکیفیت بار، مرهون استفاده از راهکارهایی چون پخش اقتصادی بار، استفاده از ذخیره کننده‌های انرژی و ایجاد هماهنگی بین نیروگاه‌های حرارتی و تولیدات پراکندهٔ شبکهٔ توزیع و به‌ویژه نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد[۴].

در این مطالعه هماهنگی به تولید نیروگاه‌های خورشیدی با واحدهای ذخیره‌ساز برای ذخیرهٔ بهینهٔ انرژی موردنظر می‌باشد. بدیهی است بهینه‌سازی فوق‌الذکر با هدف تأمین بیشترین سود بوده که در سیستم‌های تجدید ساختاریافته در سایهٔ رسیدن به قابلیت اطمینان و ریسک‌پذیری مناسب سیستم دست‌یافتنی خواهد بود. پیش‌بینی رفتار لحظه‌ای واحدهای فتوولتائیک به‌واسطه ماهیت وابسته به شرایط جوی، غیرممکن است [۵]. ازآنجاکه ذخیره توان تولیدی خورشیدی ممکن نیست، بایستی از منابع تولیدی دیگر برای ایجاد توازن بین تولید، بار و تلفات استفاده کرد. واحد هیدرو-پمپ می‌تواند به‌عنوان پشتیبان با منابع تجدید پذیر برای ایجاد این توازن تلفیق شود[۶و۷]. برای این منظور، در ابتدا پارامترهای مؤثر بر تابش خورشیدی شناسایی خواهد شد. این پارامترها با میزان تابش خورشیدی منطقه موردمطالعه (منجیل) [۸] مرتبط خواهند بود. با این پارامترها و بر مبنای مدل تابش

خورشیدی می‌توان میزان تابش را برای ساعات آینده و یا روزهای آینده پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی توسط یک شبکه آموزشی از جنس شبکه مصنوعی فازی- عصبی صورت می‌پذیرد. از ویژگی‌های شبکه مصنوعی فازی – عصبی می‌توان به‌دقت بالای پیش‌بینی در علوم مهندسی، پارامترهای تنظیمی کم و آموزش آسان در مسائل مهندسی نام برد [۹]. میزان تابش خورشیدی یکی از مسائل پیچیده در زمینه پیش‌بینی است. لذا برای آموزش آن لازم است با استفاده از داده‌های تابش خورشید ایستگاه هواشناسی از تکنیک سری زمانی در پیدا کردن الگویی برای پیش‌بینی استفاده کرد. پس از آنکه با استفاده از سری زمانی داده‌های تابش دسته‌بندی‌شده، شبکه مصنوعی فازی عصبی آموزش داده می‌شود تا بتواند توان خورشیدی تولیدی روز بعد را با دقت یک ساعت تخمین بزند، [۱۰]. البته افق پیش‌بینی برای تولیدات فتوولتائیک حدوداً ۱۵ دقیقه است اما در مسائل مربوط به بهره‌برداری بازار برق دقت یک ساعات مناسب خواهد بود. در نتیجه توان خورشیدی برای بازه‌های زمانی یک ساعته در روزهای آینده پیش‌بینی شده و برنامه‌ریزی روز بعد صورت خواهد پذیرفت. این برنامه‌ریزی طوری صورت می‌گیرد که در طول روز که توان تولیدی بیشتر است توان بالاتری به شبکه تحویل داده شود [۱۱ و۱۲]. البته با توجه به قیمت ساعتی برق، در صورتی که برای ساعات پیک، کمبود ذخیره داشته باشیم، بایستی با مصرف توان تولیدی خورشیدی در ساعات کم‌باری، این ذخیره را به حد مناسب برسانیم تا بتوانیم در زمان پیک از فروش برق با قیمت بالا بهره ببریم. در ابتدای شب، ذخیره مذکور با قیمت بالا فروخته می‌شود. بهنگام ارزان شدن قیمت بازار، واحد ذخیره‌ساز با خریداری برق از شبکه و نیز استفاده از توان مازاد واحد خورشیدی مجدداً پر خواهد شد [۱۳ و۱۴]. معمولاً مقادیر پیش‌بینی‌شده نمی‌توانند به‌طور صددرصدی تحقق یابند. از طرف دیگر هرچه پیش‌بینی تولید توان، بالاتر باشد کارگزار بازار با شانس برنده شدن بیشتری در مزایده روز بعد شرکت خواهد کرد [**Error! Unknown switch argument.**]. لذا در این مطالعه کارگزاران بازار برق این اختیار را دارند که درصدی از احتمال را در پیش‌بینی خود لحاظ کنند. هر چند ممکن است پیش‌بینی‌ها محقق شده، سود بیش-تری ببرند و یا مجبور به پرداخت ضرر شوند. واحدهای ذخیره‌ساز، پشتیبان واحد خورشیدی خواهند بود و در صورت اضافه یا کمبود تولید، در حد امکان در مقام جبران برخواهند آمد. در نهایت برای آنکه بتوان میزان سود حاصل از فروش سیستم ترکیبی خورشیدی-ذخیره‌ساز را پیش‌بینی کرد از یک معیار مناسب برای این منظور استفاده خواهد شد [۱۵]. لذا در این تحقیق ابتدا با استفاده از داده‌های تابش، پیش‌بینی برای بازه‌های زمانی روزهای بعد انجام‌شده و با قبول درصد ریسک بهره‌برداری، مقدار توان خورشیدی تخمین زده می‌شود. با توجه به قیودی مانند مقدار توان ذخیره‌شده ساعتی،

۲-۱-اهداف و فرضیه‌های پژوهش

مدیریت نیروگاه‌های خورشیدی مطابق با استانداردهای موجود

بهینه‌سازی میزان سوددهی واحدهای خورشیدی در بازار برق

به خدمت گرفتن بهینهٔ واحدهای ذخیره‌ساز به منظور مدیریت بهتر نامعینی‌های ذاتی انرژی خورشیدی

کمینه نمودن جریمه‌های مرتبط با عدم تعادل، قطع بار و ... متناسب با الگوی بازار.

لذا در این مطالعه، از واحد ذخیره‌ساز برای ایجاد پشتیبان در سیستم تولید هم‌زمان پنل‌های خورشیدی بهره گرفته شده تا ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت در تابش خورشید به‌صورت بهینه مدیریت شده و این واحدها بتوانند حضور فعال‌تر و قوی‌تری در بازار برق برای کسب سود بیشتر داشته باشند. تابع هدف ارائه‌شده در عین سادگی و در نظر گرفتن قیود فنی، سود بهینه و آلایندگی کمینه سیستم را تضمین خواهد نمود. پیش‌بینی توان خورشیدی با تکنیک ساده سری‌های زمانی و شبکه مصنوعی ANFIS با دقت پیش‌بینی بالا صورت خواهد گرفت. شایان ذکر است که از مدل نیمه سینوسی با در نظر گرفتن شاخص هوای ابری و شبکه ANFIS برای پیش‌بینی واحد خورشیدی استفاده خواهد شد.

۳-۱-پیشینه تحقیق

تاکنون فعالیت‌هایی در زمینه بهره‌برداری از تولیدات تجدید پذیر در بازار برق ارائه شده است.

در [۳] دو روش برای کاهش مشکلات ایجاد شده توسط عدم تعادلات در خروجی قدرت نیروگاه بادی ارائه شده است. اولین روش تنها پیشنهاد نیروگاه بادی را در بازار پیش رو مورد بررسی قرار می‌دهد و تلاش می‌کند تا خطای این پیشنهاد را بر اساس تحلیل آماری به حداقل برساند. در روش دوم با کمک تولید نیروگاه آبی هزینه‌های ناشی از عدم تعادل ایجاد شده در بازار را به حداقل می‌رساند.

در [۴] ابتدا روابط مربوط به میزان تابش خورشیدی در جو زمین ارائه شده و بر مبنای آن میزان تابش خورشید با استفاده از مدل نیمه سینوسی ایده آل نمایش داده شده است. پس از آن با جمع‌آوری اطلاعات تابشی یک ایستگاه ملی شبکه مصنوعی عصبی آموزش داده شده است. نتایج مطالعه مذکور، دقت آن را تائید می‌کند.

در [۵] که مطالعه جامع‌تری نسبت به مطالعات دیگر انجام داده است، برای روز آینده پیش‌بینی انجام داده و برای تولید توان بادی و هیدرو برنامه‌ریزی کرده و واحد ذخیره‌ساز را به‌عنوان پشتیبان نیروگاه بادی قرار داده است. تابع هدف مورد استفاده در عین سادگی تمامی جنبه‌های فنی را در نظر گرفته است.

در [۶] بر اساس روش سناریوسازی، عملیات مشترک واحدهای انرژی تجدید پذیر بادی-خورشیدی و تلمبه ذخیره‌ای مدل‌سازی شده و برنامه-ریزی و بهینه‌سازی مزارع بادی-خورشیدی و واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در بازار انرژی و بازارهای خدمات جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک روش جدید برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و ارزیابی این واحدها ارائه شده است. جهت رفع مشکل عدم قطعیت، برنامه‌ریزی توسط مدل بهینه‌ساز تصادفی طراحی شده است.

در [۷] یک برنامه‌ریزی چندهدفه برای مدیریت سیستم بادی-خورشیدی-هیدرو با هدف کمینه کردن آلودگی مورد نظر بوده است. در این مطالعه، برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن جنبه تصادفی تولید بادی-خورشیدی صورت گرفته است.

در [۸] بحث استفاده از شبکه‌های مصنوعی برای پیش‌بینی توان خروجی پنل خورشیدی مطرح گردیده است. این سیستم با داشتن دمای هوا و راندمان سیستم فتوولتائیک و ... توان خروجی واحد فتوولتائیک را با دقت بالا تخمین میزند.

در [۹] روش پیش‌بینی ساعتی توان خروجی واحد فتوولتائیک با استفاده از متد بهینه‌سازی حداقل مربعات با روش پیش‌بینی آب‌وهوای عددی ارائه شده است. در این مطالعه به‌واسطه کار با این روش دقت پیش‌بینی بسیار بالا می‌باشد. در ادامه معادله‌ای دقیق برای استخراج توان خروجی واحد فتوولتائیک با در نظر گرفتن ساعات ابری ارائه شده است، البته علی‌رغم دقت بالای روش ارائه شده، حجم اطلاعات و پردازش بالای این

سری زمانی ARIMA استفاده کرده است. در واقع در این تحقیق از تبدیل نور خورشید به انرژی گرمایی برای تولید برق استفاده شده است. بهینه‌سازی انجام شده با کمترین هزینه رزرو، راه اندازی و در مدار آوردن نیروگاه، قیود بهره‌برداری را ارضا می‌کند. این مطالعه در صورتی کاربرد بهینه خواهد داشت که واحد گرمایش خورشیدی (تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی گرمایی) در کنار پنل‌های خورشیدی موجود باشد.

در [۱۱] مطالعه بر روی پیش‌بینی میزان تابش خورشید با استفاده از مدل سری زمانی ARIMA برای مشارکت در بازار برق صورت گرفته است. مدل استفاده شده ساده و خطی بوده و مطالعه بر روی یک سیستم موجود صورت گرفته است. در این چنین مطالعاتی که بر مبنای روش-های ریاضی محض هستند و کلیه پارامترهای موثر بر تابش در نظر گرفته نمی‌شوند احتمال ایجاد خطای بالا وجود خواهد داشت.

در [۱۲] روشی غیرپارامتری در زمینه طراحی و بهره‌برداری از ذخیره‌ساز در شبکه توزیع در حضور عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که این روش با وجود عدم وابستگی به نوع تابع احتمالاتی، دقت بالایی دارد. این تحقیق در حضور واحدهای تولید پراکنده نیز مورد بررسی قرار گرفته و برای نشان دادن کارایی مطالعه، روش پیشنهادی با روش‌های سنتی مقایسه شده است.

در [۱۳] مدلی برای استفاده از ذخیره‌ساز انرژی به عنوان پشتیبان واحدهای تولیدی تجدید پذیر ارائه شده است. این مدل در تصمیم‌گیری بهره‌برداری مفید بوده و هماهنگی ذخیره‌سازها را با واحدهای تولیدی تجدید پذیر بررسی می‌کند. بدین ترتیب با استفاده از استراتژی این مقاله می‌توان عملکرد ذخیره‌ساز را در بازار روز بعد مشخص کرد. در این مطالعه عدم قطعیت قیمت بازار برق لحاظ شده است. نقطه ضعف این مطالعه عدم کارایی آن برای ابعاد بزرگ ذخیره‌سازی است به‌طوری‌که قیود فنی مربوط به ذخیره‌سازهای با ظرفیت بالا قابل اعمال نبوده است.

۴-۱-پشتیانی ذخیره‌ساز

یکی از مهم‌ترین ملزومات نظم‌بخشی به برنامه تولیدات تصادفی، استفاده از ذخیره‌سازها است. ذخیره‌سازها می‌توانند در ساعات ارزانی طول روز، برق توان تولیدی را ذخیره کنند و در ساعات گرانی برق، توان را به فروش برسانند. بدین ترتیب سود حاصله را افزایش خواهند داد. برای بهره‌برداری تولیدات تجدید پذیر که ماهیت غیرقطعی دارند و خروجی توان آن‌ها وابسته به شرایط آب‌وهوایی است، لازم است تمهیداتی اندیشیده شود تا بتوانند در بازار برق شرکت کنند. چراکه برای حضور تولیدکننده در بازار برق، قیود تعهد به تولید توان وجود دارد و چنانچه تولیدکننده نتواند میزان توانی را که برای تولید آن تعهد داده فراهم کند، شبکه را دچار چالش کمبود توان می‌کند؛ لذا کارگزار شبکه در واکنش به آن، تولیدکننده را جریمه می‌کند. پس لازم است تولیدکننده توان تجدید پذیر با استفاده از جبران ساز مقداری توان در حالت ذخیره داشته باشد که در صورت نامناسب بودن شرایط جوی برای تولید توان تعهد داده‌شده در روز قبل، از مقدار ذخیره استفاده کرده و کمبود را جبران کند تا شامل پرداخت جریمه نشود. اینکه چه میزان توان باید ذخیره کند و چه موقع مقدار ذخیره را خرج کند و چه موقع ذخیره را افزایش دهد وابسته به قیمت ساعتی بازار برق دارد. منطق حکم می‌کند که در ساعات گران‌تر دست به فروش بزند و در ساعات ارزانی برق را ذخیره کند؛ اما در این میان قیود فنی تولید و قیود ذخیره‌ساز این روند را دچار چالش می‌کند. این موارد در روش پیشنهادی این رساله دیده شده است. نوع ذخیره‌ساز مورد استفاده از اهمیت بالایی برخوردار است.

۵-۱-برخی از سیستم های ذخیره انرژی

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی دارای تکنولوژی‌های مختلفی هستند برخی از این تکنولوژی‌ها عبارتند از ذخیره انرژی مغناطیسی در ابررساناها (SMES)[۱]، ذخیره انرژی در ابر خازن، ذخیره انرژی در چرخ طیار (FWES)[۲]، ذخیره آب پمپاژ شده (HPES)، ذخیره انرژی در هوای فشرده (CAES)[۱]، سیستم‌های ذخیره انرژی بر پایه‌ی هیدروژن، ذخیره انرژی در باتری‌های جریانی و ذخیره انرژی در باتری.

---

[۱] Superconductor Magnetic Energy Storage

[۲] Flywheel Energy Storage

۶-۱-انواع ذخیره سازهای انرژی برای کاربردهای قدرت

ذخیره سازهای انرژی برای کاربردهای قدرت به سه گروه تقسیم می‌شوند:

۱-مکانیکی: آب پمپاژ شده، هوای ذخیره‌شده، چرخ طیار و...

۲-الکتروشیمیایی: انواع باتری‌ها، سلول سوختی و...

۳-الکترومغناطیسی: ابر خازن‌ها، ابر رساناها و...

در **Error! Unknown switch argument.**[۱] انواع ذخیره‌سازها بر حسب هم ظرفیت توان وهم زمان دشارژ طبقه‌بندی شده است.

Device	Power	MWh	Discharge Duration	Eff.	Cost $/kWh	Life Time (yr)	Class
Flywheel	<100 kW	< 100 kWh	Sec./ Min.	90 %	170-420	20-30	Short -term
Super-capacitors	<250 kW	< 3 MWh	Sec./ Min.	95 %	85-480	30-40	Short -term
SMES	0.3– 3 MW	< 250 kWh	Sec./ Min.	90 %	240-600	40	Short -term
Batteries	< 20 MW	< 200 MWh	Min./ Hours	70 – 90 %	85-4800	2-10	Long -term
Hydrogen Fuel Cells	< 20 MW	< 200 MWh	Min./ Hours	70– 90%	------	2-10	Long -term
CSP	0.1 – 200 MW	< 2 GWh	Hours	< 60 %	3500-7000	-----	Long -term
Compressed Air	100 – 300 MW	0.4-7 GWh	Days	80%	12-85	30	Real Long
Pumped Hydro	< 2 GW	< 24 GWh	Days	87%	45-85	40	Real Long

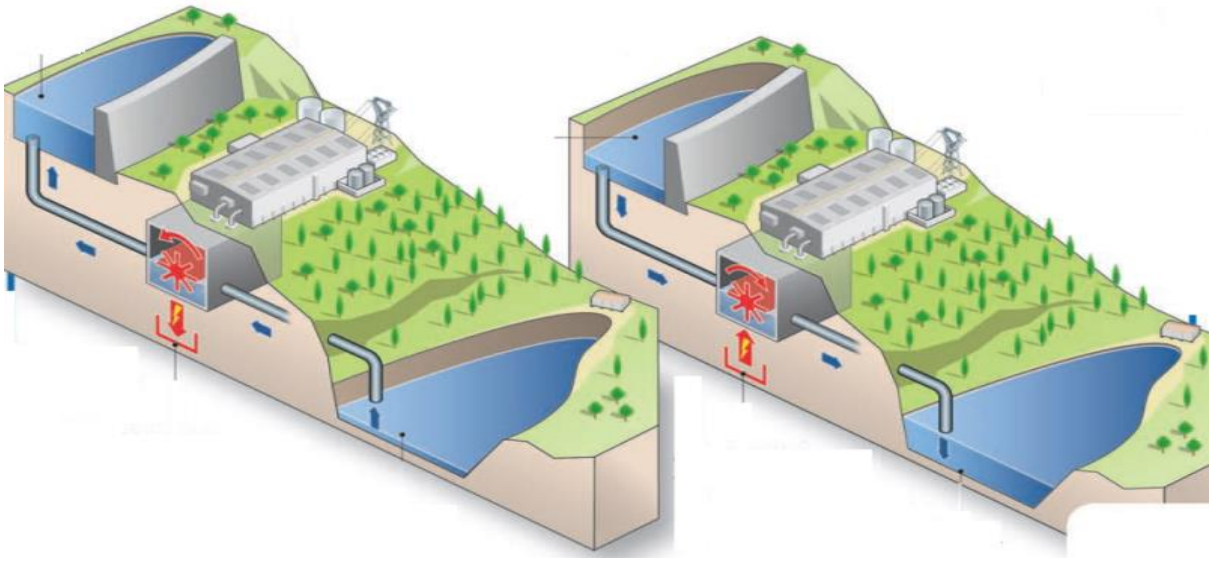
شکل Error! No text of specified style in document.**۶-۱: مقایسه انواع تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز انرژی.**

۷-۱-انتخاب بهینه ذخیره ساز

موقعیت استراتژیک اقلیم کشورمان ایجاب می‌کند که از ذخیره‌سازهای تلمبه‌ای ذخیره‌ای کوچک درمناطقی که قابلیت کاربرد ندارد، استفاده حداکثری را ببریم. در اروپا علی رغم استعداد پایین اقلیم، از این منبع استفاده حداکثری شده که جا دارد در این زمینه فعالیت‌های تحقیقاتی بیشتری صورت گیرد و امید این مطالعه بتواند نقش مؤثری را در این زمینه ایفا کند. این نوع ذخیره‌ساز علاوه بر سود حاصل از گردشگری و ذخیره‌سازی برق، می‌تواند پشتیبان تولید پراکنده و ازجمله تولیدات خورشیدی شود که کشور ما نیز از این جهت بسیار مستعد سرمایه‌گذاری است.

[۱] Compressed Air Energy Storage

علاوه بر آن با پیشرفت سیستم قدرت، شبکه‌های سراسری به سمت غیر متمرکز سازی و خصوصی سازی تولید هستند که در آینده نزدیک شبکه ایران را در بر خواهد گرفت لذا در این رساله مدیریت بازار برق مدنظر قرار گرفته و اطلاعات لازم برای بازار برق از سازمان انرژی‌های نو اروپا و گروه کاری (ANEMOS) با اندکی تصرف استخراج شده است.



شکل ۷—۱ شمای نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای

مطابق **Error! Unknown switch argument.**۱ در ساعات ارزانی برق توان تولیدی صرف تغذیه پمپ آب به مخزن بالایی شده و در ساعات گرانی برق، با آزاد کردن آب بالای مخزن به پایین و به چرخش درآوردن توربین انرژی را با قیمت بالا بفروش می‌رسانند. این سیستم-ها با راندمان بالا کار می‌کنند و هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری پایینی دارند. مسئله مهم در تولید توان توجه به منحنی قیمت بازار و در هیدرو پمپ قیود فنی آن است.

دقت شود در این رساله عملکرد سیستم هیدرو پمپ مستقل نبوده و برای پشتیبانی تولید خورشیدی استفاده می‌گردد.

۸-۱-منحنی قیمت بازار

عموماً دو نوع منحنی بار ساعتی وجود دارد. یکی منحنی با بار پایه صنعتی و دیگری منحنی با بار پایه خانگی. منحنی‌های با بار پایه صنعتی با تغییر ساعات شبانه‌روز تغییرات چندانی ندارند زیرا تولیدات صنعتی به‌صورت نوبت‌های شبانه‌روزی است؛ اما بارهای خانگی و تجاری و روشنایی عمومی وابسته به ساعت مصرف هستند؛ بنابراین با توجه به قید تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان، می‌توان نتیجه گرفت که هزینه‌های تولید در ساعات مختلف شبانه-روز متفاوت است و گاه امکان دارد شبکه برای تأمین چندساعتی تقاضاهای خود مجبور به تأسیس نیروگاه‌های با زمان راه‌اندازی سریع بزند. لذا مصرف‌کنندگانی که در این ساعات خاص توان دریافت می‌کنند مجبور به پرداخت هزینه بالاتر و تولیدکنندگانی که در این ساعات توان بفروشند سود بیش‌تری می‌کنند. شاخص تعیین کننده این سود و هزینه‌ها منحنی ساعتی بازار برق است.

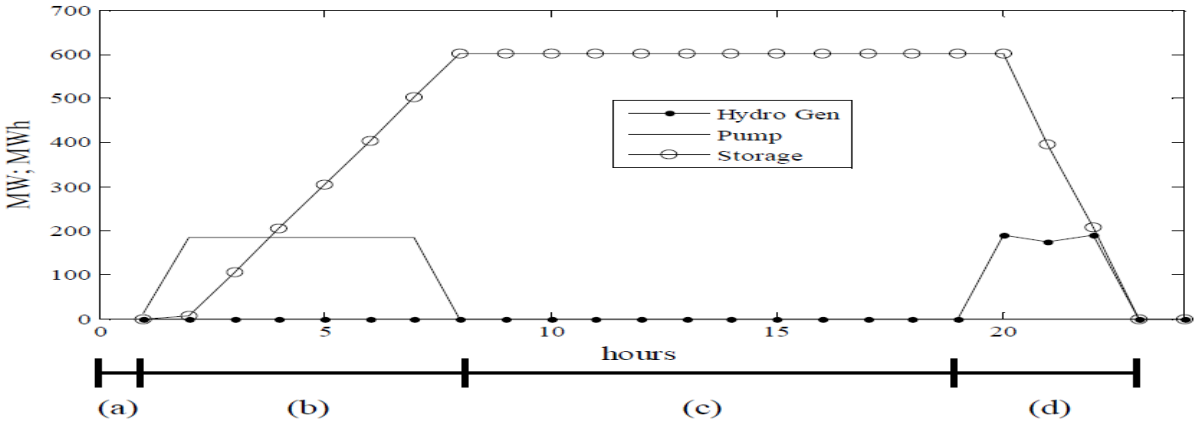
۹-۱-بهینه سازی و برنامه‌ریزی بازار برق روز بعد

هدف از این قسمت ارائه روشی برای ابعاد هماهنگی بین واحدهای خورشیدی با واحد ذخیره ساز و هیدرروتوربین است. توان تولیدی واحد خورشیدی ماهیتی کاملاً تصادفی داشته و وابسته به پارامترهای آب‌وهوا و اقلیم دارد. چنانچه این واحدهای تجدید پذیر بخواهند در تولید توان

یک بازار برق[۱] مشارکت کنند بایستی بتوانند برای تولید توان برنامه مشخصی به کارگزار بازار برق[۲] ارائه دهند. تولید توان از این طریق زمانی زمانی می‌تواند به‌صرفه باشد که در زمان اوج مصرف تولید توان داشته باشد؛ در این صورت میزان تولید آلودگی واحدهای با سوخت‌های فسیلی حداقل خواهد شد. عملکرد هماهنگ واحد خورشیدی با واحد ذخیره‌ساز تلمبه‌ای ذخیره‌ای نقش بسزایی در افزایش سود حاصله خواهد داشت. بدین ترتیب با توجه به قیمت ساعتی بازار برق در زمان پایین بودن قیمت سهم عمده تولید توان صرف تأمین توان برای پمپ آب‌شده و ذخیره-سازی صورت می‌گیرد؛ و در زمان بالا بودن قیمت علاوه بر تولید واحد خورشیدی، قسمتی از توان را میکرو توربین تأمین می‌کند. هدف ارائه روشی بهینه برای رسیدن به این مورد است.

۱۰-۱-عملیات متعارف ایستگاه ذخیره‌سازی

Error! Unknown switch argument.۱ یک نمونه عملیات ۲۴ ساعته یک ایستگاه تلمبه ذخیره را نشان می‌دهد. در این شکل چهار مرحله متفاوت در چرخه عملیات ایستگاه ذخیره‌سازی مشاهده می‌شود.



شکل Error! No text of specified style in document.**۱۰—۱: مثالی از عملکرد سنتی واحد هیدرو پمپ**

الف) توقف، انتظار برای دوره‌های ارزان‌قیمت

در ابتدای این چرخه، ایستگاه ذخیره‌سازی، انرژی ذخیره‌شده اولیه‌ای دارد که توسط $\mathbf{E_r^{begin}}$ تعریف شده است. عملکرد مطلوب نیروگاه ذخیره‌سازی می‌تواند شامل انتظار برای ارزان‌قیمت‌ترین در روز باشد (به‌طور کل، در دوره‌های با بار کم) تا شروع به شارژ مخزن آب ذخیره‌سازی کند.

ب)پر کردن مخزن آب

---

[۱] Electrical Marketing

[۲] Trader

طی دوره‌های ارزان‌قیمت، ایستگاه ذخیره‌سازی تجهیزات را برای پر کردن مخزن آب، به‌عنوان بار در سیستم برق متصل می‌کند. همان‌طور که در **Error! Unknown switch argument.** شکل داده شده، عمل مطلوب برای پر کردن تجهیزات در کل شامل اتصال آن به حداکثر ظرفیت طی ارزان‌ترین دوره‌ها، علاوه بر هزینه‌های جانبی طی دوره‌های نامطلوب‌تر می‌شود.

ج) توقف، انتظار برای دوره‌های گران‌قیمت

هنگامی‌که مخزن پر است، یا هنگامی‌که برای ذخیره‌ی بیشتر انرژی داخل مخزن به لحاظ اقتصادی مناسب نیست نیروگاه ذخیره‌سازی می‌تواند برای دوره‌های سودآورتر منتظر بماند تا انرژی ذخیره‌شده را به فروش برساند.

د) خالی شدن مخزن آب

طی دوره‌های گران‌قیمت ، نیروگاه ذخیره‌سازی می‌تواند انرژی ذخیره‌شده را به سیستم ارسال کند ، که منجر به خالی شدن مخزن می‌شود . طی این دوره‌ها ، نیروگاه ذخیره‌سازی به‌عنوان تولیدکننده عمل می‌کند. در کل، عمل خالی شدن مطلوب شامل اتصال کامل تجهیزات در طول گران‌قیمت‌ترین دوره‌ها می‌شود تا بهترین قیمت‌ها را برای تولید نیروگاه ذخیره‌سازی تضمین کند. در نیروگاه‌های ایستگاه پمپاژ، عمل خالی شدن با استفاده از تولید هیدرولیک اجرا می‌شود. پس از خالی شدن مخزن، نیروگاه ذخیره‌سازی می‌تواند به مرحله a بازگردد تا چرخه‌ی دیگری را اجرا کند.

در این رساله هدف استفاده از واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای به‌طور مجزا نیست بلکه این واحد پشتیبان واحد خورشیدی است تا بتواند مشکل غیرقطعی بودن توان تولیدیان را حل کند.

۱۱-۱-بهینه سازی بازار روز فروش

بهینه‌سازی بازار روز فروش عبارت‌اند از بهره‌گیری از قابلیت‌های ذخیره‌سازی به‌طوری‌که با ذخیره انرژی خورشیدی در هنگام دوره‌های زمانی کم‌قیمت و پرتابش بتوان آن را در دوره‌های زمانی باقیمت بالا به فروش رساند. ورودی‌های مسئله بهینه‌سازی عبارت‌اند از: اطلاعات سیستم هیدرو، توان خورشیدی و قیمت‌های ساعتی برق در روز آینده. بر مبنای اطلاعات ورودی، الگوریتم برنامه‌ریزی خطی حل خواهد شد و به وسیله آن استراتژی بهره‌برداری روزانه مبتنی بر دستیابی به بیشترین سود در بازار برق مشخص می‌شود. در این صورت مقدار توان خورشیدی که باید مستقیماً به شبکه تحویل داده می‌شود، مقدار عملکرد پمپ و مقدار انرژی تحویلی به واحد هیدرو پمپ در هر ساعت مشخص می‌گردد.

توجه گردد که در این فرمول‌بندی هزینه‌های مربوط به خطای پیش‌بینی لحاظ شده است. مسئله با استفاده از روش درون یاب حل می‌شود. در طول دوره هر ساعت توان تولیدی واحد خورشیدی ثابت فرض می‌شود. مسئله به‌صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

$$Max\sum_{i=1}^{h}(p_i \cdot P_{Gi} - c_{pump} \cdot P_{solarPi} - c_{hydro} \cdot P_{Hi}) \quad (۱-۳)$$

$$P_{Gi} = P_{solarGi} + P_{Hi} \quad (۲-۳)$$

$$P_{solari} = P_{solarGi} + P_{solarPi} \quad (۳-۳)$$

$$E_{i+1} = E_i + t.\left[\eta_p \cdot P_{solarPi} - \frac{P_{Hi}}{\eta_H}\right] \quad (۶-۳)$$

$$0 \le E_i \le E^M \quad (۷-۳)$$

$$E_1 = E_r^{begin} \quad (۸-۳)$$

$$E_{24} = E_r^{end} \quad (۹-۳)$$

$$0 \le P_{Hi} \le P_H^M \quad (۱۰-۳)$$

$$P_{Hi} \le \eta_H \cdot \left[\frac{E_i}{t} + \eta_p \cdot P_{solarPi}\right] \quad (۱۱-۳)$$

$$P_{Pi} = \sum_{k=1}^{K} P_{solarPi,k} \quad (۱۲-۳)$$

که در فرمول‌بندی بالا، p_i قیمت لحظه‌ای بازار روز فروش فردا در فاصله زمانی i است که درست پیش‌بینی‌شده است، h تعداد ساعت‌های یک شبانه‌روز، P_{Gi} توان اکتیو ارسالی به شبکه به‌وسیله سیستم خورشیدی – هیدرو توربین در بازه i است.P_{solari} توان خورشیدی موجود در بازه زمانی i به‌وسیله واحد فتوولتائیک است. $P_{solarPi}$ سهم مصرف شده توسط واحد پمپاژ است. $P_{solarGi}$ مقداری از توان P_{solari} است که به محض تولید مستقیماً به شبکه ارسال می‌شود. C_{pump} هزینه پمپ کردن، C_{hydro} هزینه تولید انرژی از واحد هیدرو پمپ، P_{Hi} توان اکتیو تولیدشده به وسیله واحد هیدرو توربین است؛ و Ei مقدار انرژی ذخیره رزرو و در هر زمانی iام و η_H و η_P به ترتیب راندمان واحدهای هیدرو پمپ است.

۱۲-۱-استراتژی بهره‌برداری

در هر روز پیشنهادهای فروش روز بعد (روز D+1) به بازار برق ارسال می‌گردد. زمان بندی پیشنهاد فروش توسط بهینه‌سازی روز فروش مطابق آنچه در قسمت قبل ارائه شد تعیین می‌گردد. بنابراین تولیدکننده توان خورشیدی نیاز به مدیریت خطاهای پیش‌بینی در طول زمان

بهره‌برداری دارد تا بتواند در استراتژی روز بعد بهینه، مقدار تولید را به مقدار بهینه نزدیک کند. توجه شود که سود به‌دست‌آمده از استراتژی روز بعد یک برون‌یابی ساده است که با فرض پیش‌بینی درست انجام گرفته است. بدین معنی که مقدار یابی درستی برای استراتژی بهره‌برداری انجام‌شده است. ایده اصلی استراتژی بهره‌برداری به‌صورت زیر است:

در ابتدا بهینه‌سازی روز بعد زمان‌بندی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را مشخص می‌کند، که این زمان‌بندی‌ها پیشنهادی برای بازار برق متکی است. پس از آن بر مبنای پیشنهادی پیش روز نسبت ضرایب مشخص می‌شود مانند درصد توان خورشیدی ارسال شده به شبکه یا$P_{solarGi}$ / P_{solari}، درصد توان خورشیدی مصرفی پمپ یا P_{solarP} / P_{solari}و درصد منتقل شده به شبکه در طول بازه زمانیt به وسیله واحد هیدرو با استفاده از انرژی ذخیره‌شده در رزرو یا $PH_{i.t}/E_i$. بنابراین استراتژی روز بعد مقداریابی می‌شود. سرانجام در طول روز موعود ضرایب نسبت یکسان به عنوان تابعی از تولید توان خورشیدی و انرژی ذخیره‌شده تحقق یافته محاسبه می‌شود.

توجه شود در طول روز بهره‌برداری خطای ناشی از پیش بینی موجب مقادیر متفاوتی از تولید توان خورشیدی یا انرژی الکتریکی پمپ شده می‌شود. بنابراین بررسی مبنی بر اطمینان از عدم تجاوز قیود فنی انجام می‌گیرد و در صورت تجاوز مقادیر، اقدامات اصلاحی صورت می‌گیرد. به‌عنوان‌مثال اگر ماکزیمم ظرفیت پمپ کردن و یا سطح آب ذخیره‌ساز از مقدار آن تجاوز کرد بایستی در سناریو بهره‌برداری، ظرفیت پمپ کردن مقدار ماکزیمم در دسترس آن تنظیم شود و یا مقدار ذخیره‌سازی ماکزیمم لحاظ گردد. اضافی توان خورشیدی نیز مستقیماً به شبکه ارسال می‌شود و در صورت قرار گرفتن در موقعیت بحرانی، از مقدار تولید کاسته خواهد شد. اگر برنامه تولید واحد هیدرو پیش از حد باشد؛ در سناریو بهره‌برداری باید روی مقدار ماکزیمم تنظیم شود و مقدار باقی‌مانده توان ارسال‌شده به شبکه برای ساعت‌های بعدی بهره‌برداری درون ذخیره‌ساز باقی بماند. سرانجام سود نهایی محاسبه می‌شود و جریمه‌های مربوطه به دلیل اختلاف مقادیر واقعی و پیشنهادی متحمل گردد.

۱۳-۱-بهینه سازی مبتنی بر شانس

به‌منظور افزایش توانمندی روش ارائه‌شده عدم قطعیت توان خورشیدی، در نظر گرفته می‌شود. برای همین پیش‌بینی‌های احتمالاتی توان خورشیدی ارائه‌شده لحاظ می‌گردد. این روش بر جنبه‌های مرتبط با ریسک تأکید دارد و به تصمیم‌گیرنده اجازه انتخاب سطح ریسک موردقبول را می‌دهد.

طبیعتاً راه‌حل‌های مبتنی بر ریسک اجازه سود بالاتر را می‌دهد اما درعین‌حال ریسک بالاتر باید پذیرفته شود. درواقع تصمیم‌گیرنده باید مصالحه‌ای بین ریسک قبول و سود احتمالی انجام دهد. برای همین یک قید مبنی بر شانس معرفی می‌گیرد[۱۶]:

$$\Pr\left\{ P_{solarGi} + P_{solarPi} \right\} \le \left[P_{solari}\right]_{1-\alpha} \qquad (۱۳$$

که Pr احتمال میانگین است.

در این مورد برای رسیدن به یک معادله قطعی فیدبک توزیع احتمالاتی P_{solari} استفاده می‌گردد.

در عمل این معادله به حل مدل قبلی در حل مقادیر کمتر توان خورشیدی منجر می‌شود. البته سود اقتصادی کمتر با ریسک کمتر همراه می‌شود. چراکه مقادیر α به شدت به ریسک وابسته است. پیشنهاد می‌شود که محاسبات برای مقادیر مختلف α انجام شود و سود هریک محاسبه شود. در نهایت به تصمیم‌گیرنده اجازه داده می‌شود که با داشتن سود و ریسک مصالحه انجام دهد.

ششمین همایش بین المللی افق های نوین در
مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mbconf.ir

در یک بازار رقابتی ریسک نقش عمده‌ای در بازاریابی واحدهای تولیدی ایفا می‌کند. اندازه‌گیری ریسک نیازمند شاخص‌های قوی است تا عوامل مهم را در برگیرد. این معیار مهم در تحلیل ریسک α می‌باشد.

معیار α تخمینی از مقدار ارزش دارایی است که می‌تواند در اثر نوسانات بازار در یک بازه زمانی خاص با یک احتمال وقوع مفروض از دست برود. این احتمال معروف سطح اعتماد نامیده می‌شود. مقادیر متداول سطح اعتماد α را بیان می‌کند.که معمولاً ۹۵٪ مواقع [illegible] می‌شود این مقدار بدین معنی است که در ۹۵٪ مواقع زیان‌های شرکت‌کنندگان کمتر از α است و در ۵٪ مواقع زیان‌های بیش از α خواهد بود. به زبان ریاضی α متناظر با توزیع درصدی سود و زیان است که می‌تواند به‌صورت افت بالقوه در ارزش فعلی دارایی و یا به‌عنوان زیان نسبت به مقدار امید ریاضی در آن بازه زمانی تعبیر می‌شود این معیار بسیاری از عوامل را به‌صورت ترکیبی در نظر می‌گیرد و عدد واحدی را به‌عنوان ارزیابی اثر ریسک ارائه می‌دهد. در صورتی که یک عامل متغیر در عملکرد بازار وجود داشته باشد سطح اعتماد ۹۵٪ از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

برای توضیح بیشتر این مفهوم به مثال زیر توجه شود. اگر برای یک ساعت مشخص دو بازیگر بازار برق داشته باشیم: اولی با مقدار α برابر ۷۵٪ پیش‌بینی توان تولیدی 4MWرا می‌کند و دومی با ریسک کمتر یعنی ۹۵٪ =α، مقدار 2MW را پیشنهاد می‌کند. بازیگر دوم ۵٪ و بازیگر اول ۲۵٪ ریسک را قبول کرده است. البته اگر مقدار پیش‌بینی‌شده تحقق یابد بازیگر اول سود بیش‌تری خواهد برد.

۱۴-۱-شبکه موردمطالعه

در این رساله یک واحد پمپاژ با ظرفیت ۱۸۴ مگاوات باراندمان ۸۴٪، یک مجموعه فتوولتاییک با مساحت ۱۰۰۰۰ متر مربع با راندمان ۹۴٪ -که ظرفیت آن با استفاده از رابط (۲-۱۵) محاسبه می‌شود-در منطقه منجیل [8] مفروض است. اطلاعات دریافتی تابش از سازمان هواشناسی کشور مطابق **Error! Unknown switch argument.** است.

۱۵-۱-پیش‌بینی با استفاده از شبکه ANFIS

به منظور پیش‌بینی تابش از شبکه ANFIS استفاده شده است. از کل اطلاعات ۶۰٪ کل اطلاعات برای آموزش[۱]، ۲۰٪ برای کنترل[۲] فرآیند آموزش و ۲۰٪ برای تست[۳] استفاده شده است. خطای شبکه آموزش دیده در حدود ۱۴٪ است که در مقایسه با مطالعات قبلی خطای منطقی است. برای آزمودن دقت شبکه ANFIS بطور تصادفی روز اول تا ششم دی‌ماه انتخاب شد.

به منظور پیش‌بینی توان خورشیدی از شبکه ANFIS دیگر استفاده شده است. در مورد ورودی و خروجی‌های آن قبلاً توضیح داده شد. دیتای آموزش شامل $[G_{savg}, TOD_{\max}, NDD, T_{avg}, n, h]$ می‌شود.

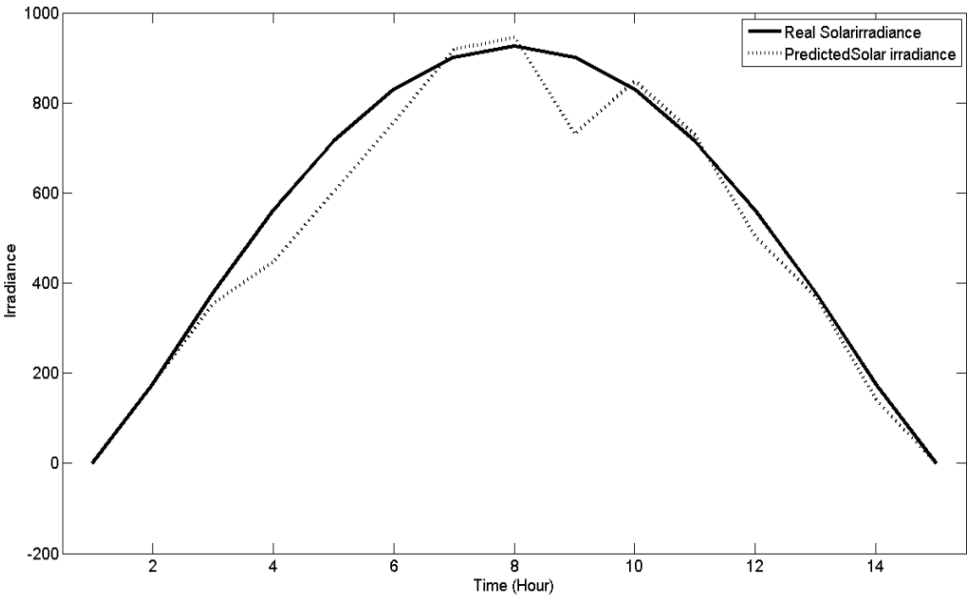
خطای آموزش برابر ۲۵٪ است که نسبت به مطالعات قبلی نیز خطای قابل قبولی می‌باشد(**Error! Bookmark not defined.**). توان خروجی پیش‌بینی شده و واقعی تابش خورشید با در نظر گرفتن مدل هوای ابری در همین تاریخ و همین مکان به ازای دمای محیط برابر ۳۷ درجه سانتی گراد مطابق **Error! Reference source not found.**۱ است. دقت شود که خروجی پیش‌بینی با دیتای آموزش مربوط به اول تا ۱۶ مرداد است. برای محاسبه TOD منحنی G_d لازم است از منحنی آن مشتق سوم گرفته شود که البته با وجود نقاط تعریف شده بایستی از تکنیک برازش منحنی استفاده کرد. پس از انجام برازش منحنی TOD به‌صورت **Error! Unknown switch argument.** به دست می‌آید.

---

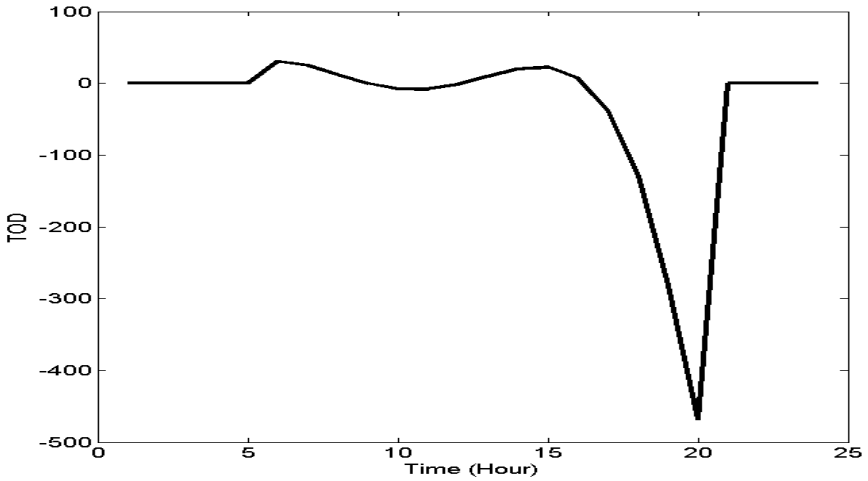
[۱] Training

[2] Checking

[۳] Testing

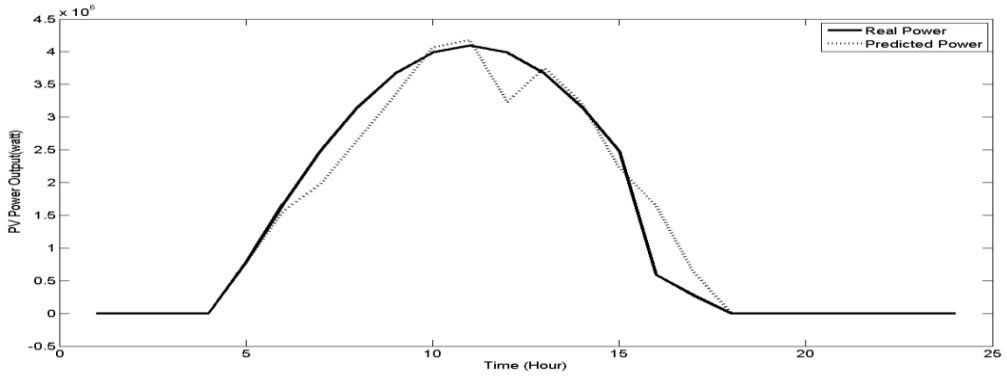


شکل .Error! No text of specified style in document.۱۵**—۱ :شاخص‌های مربوط به معادله برای تأمین دیتای تابش آموزش شبکه ANFIS**



شکل۱- .Error! No text of specified style in document.**۱۵-۱-منحنی TOD تابش با برازش تابع درجه۷**

همان‌طور که از ۱۵-۱شخص است. شبکه ANFIS با دقت بالایی توانسته توان خورشیدی را پیش‌بینی کند.



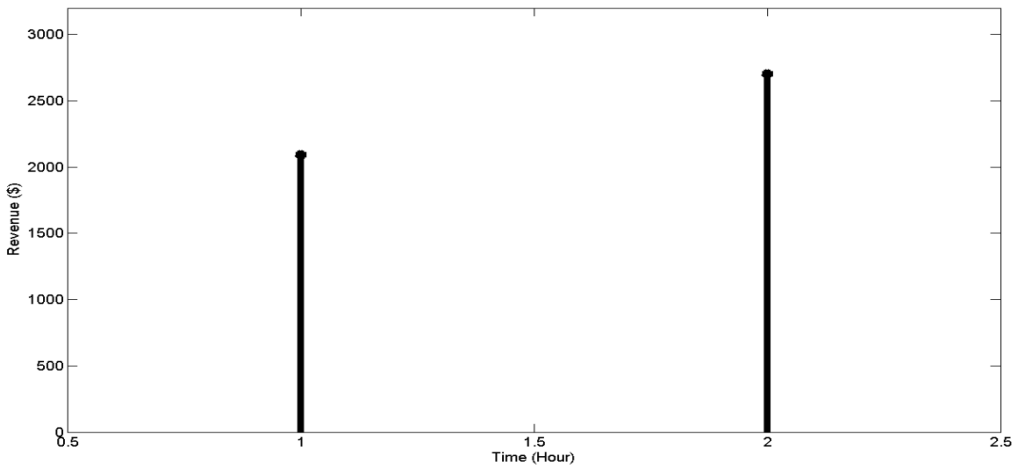
شکل۲- .Error! No text of specified style in document۱۵-۱-: مقایسه خروجی شبکه آموزش‌دیده برای پیش‌بینی توان خروجی پنل رئیسه خورشیدی

۱۶-۱-آنالیز حساسیت

برای مقایسه مزایای سیستم هیدرو پمپ-خورشیدی آنالیز حساسیت سود ناشی از این سیستم‌های ترکیبی ارائه شده است. بدین صورت حساسیت سود ناشی از بهره‌برداری بهینه نسبت به حالات خورشید، خورشید- هیدرو پمپ سنجیده شده است.

در حالت اول سود حاصل فروش برق به‌صورت حاصل‌ضرب قیمت ساعتی بازار در میزان توان فروخته شده محاسبه می‌شود. برای حالات حضور ذخیره‌ساز لازم است از معادله (۳-۱۴) استفاده شود تا بتوان با استفاده از آن میزان هزینه ذخیره‌ساز را در معادله سود وارد کرد.

حالت دوم حضور سیستم هیدرو پمپ-خورشید است. در **Error! Unknown switch argument.** میزان سود ناشی از بهره‌برداری از این دو سیستم دیده می‌شود. توجه شود که در حالت دوم از استراتژی قسمت **Error! Reference source not found.** استفاده شده است.



شکل .Error! No text of specified style in document۱۶—۱: آنالیز حساسیت سود در سیستم‌های مورد مطالعه

۱-۱-نتیجه‌گیری

ششمین همایش بین المللی افق های نوین در
مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mhconf.ir

این مطالعه علی‌رغم کارهای گذشته، با توجه به بهینگی و افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های اتصالات و هزینه‌های مربوط به ادوات ریز شبکه‌ها (مثلاً باتری) به هنگام استفاده از سیستم از تولید پنل‌های خورشیدی بهره گرفته شده است. همچنین از واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای به عنوان پشتیبان جهت پوشش ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت در تابش خورشید به‌منظور حضور فعال‌تر و قوی‌تر در بازار برق استفاده شده است. تابع هدف ارائه شده از مراجع مذکور الهام گرفته شده به‌طوری که تابع ارائه شده در عین سادگی قیود فنی را در برگرفته است همچنین از مدل نیمه سینوسی با در نظر گرفتن شاخص هوای ابری و شبکه ANFIS برای پیش‌بینی آن استفاده‌شده است.

در روز بعد با داشتن مقدار توان تولیدی خورشیدی از نتایج شبکه ANFIS، بهره‌گیری از بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی مقدار توان تولیدی واحد هیدرو، ذخیره‌سازی واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای و مقدار سهم توان خورشیدی که بایستی مستقیماً به شبکه تزریق شود را مشخص می‌کند. از طرفی روش استفاده‌شده در این مطالعه عدم قطعیت در زمینه تولید خورشیدی را به‌طوری لحاظ می‌کند که درصد ریسک برای سرمایه‌گذار مشخص باشد.

نتایج حاکی از آن است که استفاده از روش ارائه شده سود حاصل از مشارکت واحد خورشیدی-ذخیره ساز را افزایش خواهد داد. در مجموع موارد زیر در این رساله ارائه شد.

پشتیبانی تولید خورشیدی با استفاده از ذخیره‌ساز هیدرو پمپ

پیش‌بینی تولید خورشیدی در روز آینده با استفاده از پارامترهای مؤثر بر تابش

استفاده از شبکه فازی عصبی برای پیش‌بینی

استفاده از مقادیر پیش‌بینی‌شده برای پیشنهاددهی به بازار برق فردا

تعیین دقیق میزان تولید خورشید ساعتی با توجه به مدل هوای ابری

تعیین میزان ذخیره در روز ساعات روز بعد با توجه به باقی‌مانده آب در ذخیره‌ساز و قیمت ساعتی بازار

میزان ذخیره‌سازی یا آزادسازی آب در هر ساعت

محاسبه سود در تابع هدف ارائه‌شده با کمینه کردن میزان ریسک

۱۸-۱-پیشنهاد کارهای آینده

بررسی مقدار هزینه‌های ناشی از عدم تعادل

پیش‌بینی قیمت بازار روز بعد با استفاده از شبکه فازی-عصبی

انجام آنالیز هزینه سرمایه‌گذاری واحد ذخیره‌ساز برای ایفای نقش پشتیبان و مستقل به‌طور هم‌زمان

استفاده از تکنیک‌های جدید غیرخطی سیستم‌های ذخیره‌ساز چندمرحله‌ای و تلفیق آن با روش بهینه‌سازی خطی ارائه‌شده در این رساله

مراجع

[۱] Pinson,P., Chevallier,C., Kariniotakis, G.N., "Trading wind generation from short-term probabilistic forecasts of wind power", IEEE Trans. On Power Systems, 2007, Vol.22, pp.1148-1156.

[۲] Wang, F, et al, "Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters", journal of Energies, 2012, Vol. 5, pp.1355-1370

[۳]کریمی ورکانی، ع،پارسا مقدم، م، "بهره‌برداری بهینه منابع ذخیره‌ساز برای شرکت نیروگاه بادی در بازار برق"، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران،۱۳۹۰.

[٤] Wang F., Mi Z., Su S., H.Zhao,"Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters", journal of Energies, 2012, Vol. 5, pp.1355-1370.

[٥] Castronuovo E.D., Usaola J., Bessa R., Matos M.A., Costa I.C., et al. ,"An integrated approach for optimal coordination of wind power and hydro pumping storage", Wind Energy, Wiley-Blackwell, 2014, Vol. 17, pp.829-852.

[٦] Parastegari M., Hooshmand R., Khodabakhshian A., Zare A.H.,"Joint operation of wind farm, photovoltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets", Electrical Power and Energy Systems, 2015, Vol. 64, pp.275-284.

[۷] Ma R., Li X., Wu Z., Zhang Q.,"Multi-objective optimal scheduling of power system considering the coordinated operation of photovoltaic-wind-pumped storage hybrid power", International Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technology, 2015, pp.693-698.

[۸] M. Naghsh Naghshineh and M. Mahdavian, "An Optimization Method for Participation of a Wind-solar-hydro Pumped in Daily Ahead Operation, International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.17 No.7, July 2017.

[۹] Liu J. Fang W. Zhang X. Yang Ch."An improved photovoltaic power forecasting model with the assistance of aerosol index data", IEEE Trans. On Sustainable Energy, 2015, Vol. 6, No. 2, pp.434-442.

[۱۰] Larson D.P. Nonnenmacher L. Coimbra C.F.M."Day-ahead forecasting of solar power output from photovoltaic plants in the American Southwest", Elsevier press on Renewable Energy, 2016, Vol. 91, pp.11-20.

[۱۱] Xu T. Zhang N."Coordinated operation of concentrated solar power and windresources for the provision of energy and reserve services", IEEE Trans. On Power Systems, 2016, Vol. 32, No. 2, pp.1260-1271.

[۱۲] Hussain S. Alili A.A."Day ahead hourly forecast of solar irradiance for Abu Dhabi, UAE", IEEE Conf. On Smart Energy Grid Engineering, pp.68-71, 2016.

[۱۳] Akhavan-Hejazi H. Mohsenian-Rad H."Energy storage planning in active distribution grids:a chance-constrained optimization with non-parametric probability functions", IEEE Trans. On Smart Grid, 2016, pp.1-13.

[۱٤] Krishnamurthy D. Uckun C. Zhou Z. Thimmapuram P. Botterud A."Energy storage arbitrage under day-ahead and real-time price uncertainty", IEEE Trans. On Power Systems, Early Access, 2017, pp.1-11.

[۱٥] Angarita J.L. Usaola J. Martinez-Crespo J."Combined hydro-wind generation bids in a pool-based electricity market", Electric Power System Research, 2013, Vol. 7, pp.1038-1046.

[16] Charnes A. Cooper W. W. 1963, "Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints, Operations Research, 11, pp. 18-39.