ارزیابی تأثیر قرارداد بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه تحت شرایط عدم قطعیت بر روی سود سیستم هیبریدی در بازار برق

مرتضی زارع اسکوئی[۱]، کارشناس ارشد؛ احمد صادقی یزدانخواه[۲]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - mortteza.zare@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - sadeghi@sut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک چهارچوب کلی به منظور مطالعه تأثیر میزان قرارداد بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه (MG[۱]) بر روی سود سیستم هیبریدی در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. سیستم هیبریدی مورد مطالعه شامل مزارع بادی، سامانه فتوولتائیک (PV[۲]) و واحد تلمبه-ذخیره‌ای (PSH[۳]) می‌باشد. در این روش هدف به حداکثر رساندن سود سیستم هیبریدی با برنامه‌ریزی بهینه‌ی واحد تلمبه- ذخیره‌ای در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس (FBP[۴]) در بازار روز-پیش می‌باشد. از واحد تلمبه- ذخیره‌ای جهت کاهش نامتعادلی‌های مثبت و منفی انرژی در طول زمان برنامه‌ریزی و همچنین حداکثر سازی سود سیستم هیبریدی از طریق مشارکت در کنترل فرکانس شبکه بر اساس قیمت انرژی استفاده شده است. ماهیت غیرقطعی توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، این مسئله برنامه‌ریزی را به یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی تبدیل می‌کند. برای نشان دادن مزایای روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه سازی برای سناریوهای مختلف باد و خورشید در بازار روز-پیش اجرا شده است. نتایج عددی بیانگر تاثیرات مثبت روش پیشنهادی بر روی سیستم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس، ریزشبکه، برنامه‌ریزی تصادفی، واحد تلمبه-ذخیره‌ای، مزرعه بادی، منابع فتوولتائیک.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله:۱۳۹۶/۰۲/۱۶

نام نویسنده مسئول: احمد صادقی یزدانخواه

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز – شهر جدید سهند - دانشگاه صنعتی سهند - دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

۱- مقدمه

طی دو دهه‌ی گذشته، میزان دسترسی و استفاده‌ی کشورهای در حال توسعه از انواع منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش چشمگیری یافته است. استفاده از این منابع برای رشد و توسعه‌ی اقتصادی کشورها اهمیت اساسی دارد. مطالعات انجام گرفته نشان دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم موجود مابین سطح توسعه یک کشور و میزان مصرف انرژی آن می‌باشد [۱]. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده در سراسر جهان، انرژی بادی و خورشیدی رشد سریعتری نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر داشته‌اند. این منابع می‌توانند تلفات شبکه را به حد قابل توجهی کاهش دهند و همچنین کیفیت توان ارائه شده و پایداری سیستم را بهبود بخشند [۲،۳].

یک سیستم هیبریدی متشکل از منابع مختلف تجدیدپذیر و منابع ذخیره‌ساز انرژی، علاوه بر اینکه نسبت به نیروگاه‌های سنتی مزایای بسیاری دارد، دارای معایبی نیز می‌باشد. از مهمترین چالش‌های سیستم‌های هیبریدی وابستگی شدید توان تولیدی این منابع به شرایط محیطی است. با پدیدار شدن مساله تجدیدساختار در سیستم‌های قدرت و وجود حق انتخاب منابع تولیدی برای مصرف کنندگان در این ساختار، بهره‌برداران سیستم‌های هیبریدی با استفاده از اعمال برخی شرایط جدید و محدودیت‌های لازم باید توان تولیدی خود را به مقدار توان متعهد شده به بازار برق مورد نظر نزدیکتر کنند. در اغلب مواقع با اجرای بازار انرژی در محیط تجدید ساختار یافته، به دلیل وجود عدم قطعیت در توان خروجی سیستم هیبریدی، شاهد به وجود آمدن اختلاف نسبتاً چشمگیری مابین میزان توان متعهد شده و توان واقعی تحویلی به شبکه خواهیم بود [۴].

به مقدار انرژی مبادله شده مابین شبکه‌ی قدرت و سیستم هیبریدی که از تفاضل انرژی واقعی تحویلی به شبکه و انرژی متعهد شده‌ی سیستم هیبریدی حاصل می‌شود، تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده (UI^{Δ}) می‌گویند. هرچقدر مقدار این انرژی بیشتر گردد، میزان سود دریافتی سیستم هیبریدی نیز کاهش خواهد یافت [۴]. صرف‌نظر از کاهش سود سیستم هیبریدی، برآورده نشدن انتظارات شبکه از طرف سیستم هیبریدی باعث بروز اختلالات اساسی مانند افت فرکانس در سیستم قدرت می‌شود. در سیستم قدرت رقابتی، منابع تولیدی سعی در جلب رضایت مصرف کنندگان دارند. این امر با تامین تقاضای مورد نیاز مصرف کنندگان در هر بازه‌ی زمانی به وقوع می‌پیوندد. در صورت کاهش نیافتن مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده، میزان توجه و استفاده از سیستم‌های هیبریدی کاهش یافته و همچنین موضوع قابلیت اطمینان سامانه در تامین بار کاهش می‌یابد.

برای کاهش مقدار نامتعادلی انرژی از منابع ذخیره ساز انرژی استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین منابع ذخیره ساز انرژی، واحد تلمبه-ذخیره‌ای است. مهمترین دغدغه‌ی استفاده از سیستم هیبریدی شامل باد، فتوولتائیک و واحد تلمبه-ذخیره‌ای، استفاده بهینه از عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای جهت حداکثر سازی سود سیستم می باشد.

در مراجع [۵،۶] بر روی بهبود عملکرد سامانه‌ی هیبریدی شامل مزرعه بادی و واحد تلمبه-ذخیره‌ای مطالعه شده است. در این مراجع، بهینه سازی با هدف تعیین سایز واحدها و یا تعداد واحدها انجام شده است. در این مراجع برنامه‌ریزی انجام شده برای تولید واحدها مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی و مباحث مربوط به تولید سناریو نمی‌باشد. در مراجع [۹-۷] سود حاصل از عملکرد یک ریزشبکه در بازار روز-پیش محاسبه شده است. در این مراجع بحث مربوط به بهبود فرکانس شبکه مطرح نگردیده و از مقادیر ثابت در بازار برق برای لحاظ جریمه‌ی کسری یا مازاد تولید توان واحدهای تجدیدپذیر استفاده شده است. همچنین همه‌ی مراجع فوق بررسی‌های خود را فقط معطوف انرژی بادی و واحد تلمبه-ذخیره‌ای کرده‌اند و انرژی خورشیدی را در نظر نگرفته‌اند.

یکی از دلایل مهم به کار بردن منابع خورشیدی در این مقاله، نحوه‌ی تغییر پروفیل توان تولیدی این منابع نسبت به منابع بادی می‌باشد. پروفیل تولید انرژی منابع بادی و خورشیدی در یک بازه‌ی روزانه و حتی فصلی مکمل هم می‌باشند [۱۰]. بنابراین بهترین حالت برای ایجاد یک سیستم هیبریدی مناسب، استفاده همزمان از منابع بادی و خورشیدی به همراه منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد.

در این مقاله، هدف حداکثر سازی سود یک سیستم هیبریدی شامل مزارع بادی، سیستم فتوولتائیک و واحد تلمبه-ذخیره‌ای متصل به یک ریزشبکه با کاهش تبادل مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده ، تحت محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس برای بازار روز-پیش می‌باشد. نقش اساسی واحد تلمبه- ذخیره‌ای کنترل فرکانس سیستم و کاهش انتقال مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده است. با پیاده‌سازی ساختار قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس، عملکرد و نظم شبکه بهبود پیدا می‌کند.

لازم به ذکر است که برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم هیبریدی شامل عناصر مورد نظر در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس برای حداقل کردن میزان تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده با در نظر گرفتن میزان قرارداد بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه بر مبنای برنامه‌ریزی تصادفی برای اولین بار در این مقاله بررسی شده است. نوآوری‌های عمده‌ی این مقاله نسبت به مطالعات قبلی عبارتند از: (۱) بهره‌برداری از واحد ذخیره‌ساز تلمبه-ذخیره‌ای در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس جهت برنامه‌ریزی بهتر میزان تولید سیستم هیبریدی و افزایش سود این سیستم. (۲) بررسی تاثیر میزان قرارداد بسته شده مابین ریزشبکه و سیستم هیبریدی بر روی سود دریافتی بهره‌بردار سیستم هیبریدی.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. ابتدا در بخش دوم محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس معرفی شده است. سپس نحوه‌ی عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در این محیط در بخش سوم شرح داده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

شده است. بخش چهارم به پیاده‌سازی ریاضی مسئله شامل فرمول بندی تابع هدف و قیود مسئله پرداخته است. در بخش پنجم روش پیشنهادی بر روی یک ریزشبکه‌ی متداول اعمال شده و نتایج حاصل از آن جهت نشان دادن بهبود عملکرد سیستم هیبریدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت حل مسئله‌ی بهینه سازی در این مقاله از نرم افزار GAMS استفاده شده است.

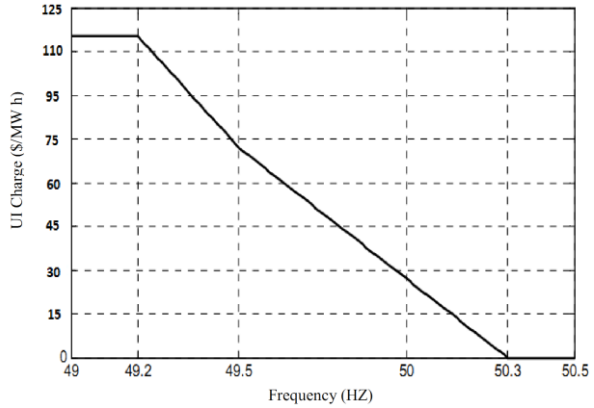
۲- محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس

در طول عملکرد سیستم قدرت ممکن است در برخی ساعات میزان توان تولید شده کمتر و یا بیشتر از مقدار برنامه‌ریزی شده باشد. این اختلاف در تولید باعث به وجود آمدن مقداری انرژی برنامه‌ریزی نشده در سیستم می‌شود. این مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده که به علت وجود فاصله مابین عرضه و تقاضا به وجود آمده است تاثیرات قابل ملاحظه‌ای بر روی فرکانس سیستم می‌گذارد. در محیط تجدیدساختار یافته، قابلیت اطمینان منابع تامین کننده‌ی انرژی جهت تامین بارها شدیداً مورد توجه مصرف‌کنندگان جهت انتخاب منابع تولید انرژی قرار دارد. بحث مربوط به فرکانس نیز یکی از مهمترین عواملی است که در انتخاب‌های مشتریان نقش مهمی ایفا می‌کند. هرچقدر فرکانس خروجی منابع تولیدی در حد فرکانس پایه‌ی سیستم باثبات رفتار کند، مورد توجه مصرف‌کنندگان بسیاری قرار خواهد گرفت [۱۱]. منابع انرژی تجدیدپذیر به خاطر وابستگی شدید به شرایط محیطی، باعث به‌وجود آمدن نوسانات بسیاری در فرکانس خروجی سیستم می‌شوند. این منابع برای مشارکت در بازار برق، نیاز مبرمی به کاهش مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده در تعهدات خود دارند.

پس باید به نحوی فرکانس غالب شبکه با هزینه‌های مربوط به سیستم‌های هیبریدی ارتباط داشته باشد [۱۲]، تا در صورت کاهش شدید فرکانس سود سیستم نیز تحت تاثیر قرار بگیرد. با این کار سیستم‌های هیبریدی برای رفع این کمبود توان راهکارهای بهتری را در پیش خواهند گرفت. امروزه به منظور بهبود کیفیت توان تحویلی سیستم‌های هیبریدی، مقدار هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده بر اساس فرکانس سیستم تعیین می‌شود. اساس کار این روش کاهش اختلاف مابین عرضه و تقاضا است که با انجام این کار فرکانس سیستم در محدوده‌ی قابل قبولی حفظ می‌شود. این نوع روش قیمت‌گذاری که فرکانس سیستم را نیز بهبود می‌بخشد، باعث به وجود آمدن یک ساختار جدید به نام Availability Based Tariff (ABT) شده است [۱۳]. از مهمترین دستاوردهای اجرای این روش می‌توان به بهبود نظم و انضباط سیستم، کارکرد سیستم در فرکانس پایه (۵۰/۶۰HZ) یا در نزدیکی‌های آن، کاهش چشمگیر تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده و استفاده‌ی بهتر از منابع اشاره نمود [۱۴، ۱۵].

ساختار ABT از سه جزء تشکیل یافته است [۱۳]: ۱- هزینه‌های ثابت تولید انرژی که مربوط به ظرفیت نیروگاه‌های تامین کننده‌ی انرژی می‌باشد. ۲- هزینه‌های متغیر که مربوط به هزینه‌ی سوخت لازم جهت تولید انرژی برنامه‌ریزی شده می‌باشد. ۳- هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده که مربوط به انحراف از مقدار انرژی برنامه‌ریزی شده است. با استفاده از جزء سوم این ساختار میزان انرژی برنامه‌ریزی نشده بشدت کاهش می‌یابد. با توجه به ساختار ABT، مقدار تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده به ازای کاهش یا افزایش فرکانس سیستم محاسبه خواهد شد. بنابراین برای تعیین مقدار این هزینه در هر بازه‌ی زمانی، ابتدا باید فرکانس سیستم برای هر بازه‌ی زمانی محاسبه شود و سپس مقدار هزینه انرژی برنامه‌ریزی نشده با توجه به شکل ۱ محاسبه خواهد شد. طبق این شکل، هنگامی که فرکانس سیستم از فرکانس پایه بیشتر شود، مقدار هزینه‌ی اختصاص یافته به انرژی برنامه‌ریزی نشده کمتر خواهد بود. ولی اگر فرکانس سیستم از فرکانس پایه کمتر باشد، هزینه‌ی اختصاص یافته به مقدار برنامه‌ریزی نشده به‌شدت افزایش می‌یابد. پس مقدار هزینه‌ی اختصاص یافته به تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده با فرکانس رابطه‌ی معکوسی دارد. تا زمانی که کارکرد سیستم قدرت طبق برنامه‌ی از پیش تعیین شده باشد، مقدار هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده صفر خواهد بود.

تغییرات مربوط به هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده نسبت به فرکانس برای بار اول در سال ۲۰۰۰ به صورت یک منحنی بیان شد. این تغییرات بر اساس مقررات تنظیم شده از طرف کمیسیون تنظیم مقررات برق هند به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر موجود در ساختار ABT اعلام گردید. برای اولین بار طبق اعلام این سازمان، محدوده‌ی تغییرات مجاز فرکانس برای تعیین انرژی برنامه‌ریزی نشده مابین ۴۹ تا ۵۰/۵ هرتز در نظر گرفته شد. اما در سال ۲۰۰۹ این مقررات تغییر یافت و محدوده‌ی فرکانس به حد ۴۹/۲ تا ۵۰/۳ هرتز تغییر یافت [۱۶]. در این مقاله از نمودار ارائه شده در [۱۶] برای تعیین هزینه‌ی تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده که در سال ۲۰۰۹ توسط کمیسیون تنظیم مقررات برق هند انتشار یافته است، استفاده خواهد شد. این نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): هزینه‌ی تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده در ساختار ABT [۱۶]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

۳- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در ساختار ABT

واحد تلمبه-ذخیره‌ای جزء بزرگترین واحدهای ذخیره‌ی انرژی به شمار می‌آید. هدف مورد نظر در استفاده از واحد تلمبه-ذخیره‌ای، کاهش فاصله‌ی مابین عرضه و تقاضا در سیستم‌های هیبریدی است. عملکرد هماهنگ واحد ترکیبی، متشکل از نیروگاه بادی، خورشیدی و واحد تلمبه-ذخیره‌ای تحت محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس تفاوت زیادی با دیگر حالت‌های استراتژی مدیریت انرژی بر روی این سیستم‌ها دارد. در واقع، هدف از بکاربردن واحد تلمبه-ذخیره‌ای در این محیط قیمت‌گذاری به همراه منابع تجدیدپذیر فقط کاهش مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده در هر لحظه نمی‌باشد، بلکه این واحد باید از مقررات حاکم بر این نوع محیط قیمت‌گذاری نیز تبعیت کند.

عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای تحت محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس به عوامل زیر بستگی دارد:

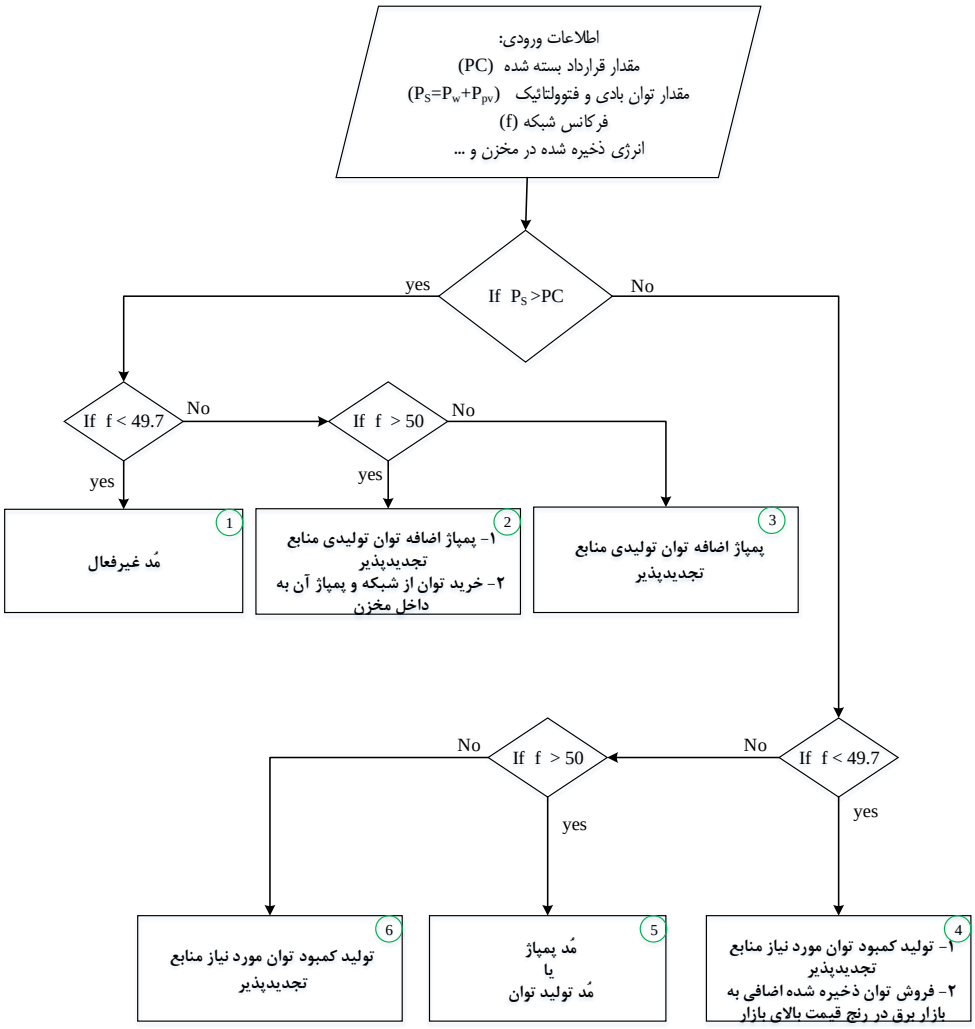
- مقدار قرارداد بسته شده در هر ساعت مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه برای تامین بار ریزشبکه.
- مقدار توان موجود منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی.
- فرکانس شبکه.
- محدودیت‌های واحد تلمبه-ذخیره‌ای، اعم از میزان انرژی ذخیره شده و ....

بر اساس اطلاعات ذکر شده، باید یک الگوریتم مناسب برای تصمیم‌گیری در مورد عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای ارائه شود. بر اساس مقررات موجود برای محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس، بازه‌ی قابل تغییر فرکانس در محدوده‌ی ۴۹/۷ تا ۵۰/۲ هرتز می باشد [۱۷]. جزئیات عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در شکل ۲ به صورت یک فلوچارت طراحی شده است. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای به ۶ حالت تقسیم بندی می‌شود. حالت‌های ۱،۲و۳ برای زمان‌هایی است که میزان تولید منابع بادی و فتوولتائیک از قرارداد بسته شده بیشتر باشد، در حالی که، حالت‌های ۴،۵ و۶ برای زمان‌هایی است که میزان تولید منابع تجدیدپذیر کمتر از مقدار قرارداد بسته شده باشد. در زیر به شرح هر یک از شش حالت موجود می‌پردازیم:

- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت اول: هنگامی که مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک بیشتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم کمتر از ۴۹/۷ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت غیرفعال خواهد بود. در این شرایط بهتر است اضافه توان سیستم هیبریدی با نرخ انرژی برنامه‌ریزی نشده به شبکه فروخته شود.
- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت دوم: اگر مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک بیشتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم بیشتر از ۵۰ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت پمپاژ خواهد بود. در این حالت واحد تلمبه-ذخیره‌ای ابتدا انرژی مازاد را به صورت هیدرولیکی در مخزن ذخیره‌سازی می‌کند، سپس در صورت مساعد بودن شرایط از جمله وجود فضای خالی در مخزن و همچنین پایین بودن قیمت بازار، سیستم هیبریدی شروع به خرید انرژی، با نرخ پایین انرژی برنامه‌ریزی نشده، از شبکه می‌کند و آن را در مخزن موجود ذخیره سازی می‌کند.
- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت سوم: اگر مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک بیشتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم مابین ۴۹/۷ هرتز و ۵۰ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت پمپاژ خواهد بود. در این شرایط بهتر است واحد تلمبه-ذخیره‌ای فقط انرژی مازاد منابع را به صورت هیدرولیکی ذخیره نماید.
- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت چهارم: در صورتیکه که مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک کمتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم کمتر از ۴۹/۷ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت ژنراتوری خواهد بود. در این حالت واحد تلمبه-ذخیره‌ای انرژی هیدرولیکی ذخیره شده را به حالت انرژی الکتریکی تبدیل خواهد کرد. به طوری که نخست واحد تلمبه-ذخیره‌ای کسری میزان متعهد شده‌ی سیستم هیبریدی را تامین می‌کند و در صورت وجود انرژی اضافی‌تر اقدام به فروش انرژی، با نرخ بالای انرژی برنامه‌ریزی نشده، به شبکه می‌کند.
- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت پنجم: اگر مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک کمتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم بیشتر از ۵۰ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای اجازه‌ی فعالیت در دو حالت پمپاژ و یا تولید را خواهد داشت. بسته به عملکرد سیستم در طول ۲۴ ساعت این مد کاری برای واحد تلمبه-ذخیره‌ای مشخص می‌شود. بنابراین با توجه به شرایط بهینه‌سازی می‌توان کمبود توان تولیدی منابع بادی و فتوولتائیک را از دو طریق تامین کرد. یا با تزریق توان توسط واحد تلمبه-ذخیره‌ای و یا با خرید توان از شبکه. در صورت مساعد بودن شرایط بعد از تامین کسری انرژی می‌توان مقداری از توان خریداری شده را به داخل مخزن پمپاژ کرد.
- عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت ششم: اگر مقدار تولید منابع بادی و فتوولتائیک کمتر از قرارداد بسته شده با شبکه باشد و همچنین فرکانس سیستم مابین ۴۹/۷ هرتز و ۵۰ هرتز باشد، واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت ژنراتوری خواهد بود. در این شرایط بهتر است واحد تلمبه-ذخیره‌ای فقط کمبود انرژی منابع را تامین کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]



شکل (۲): عملکرد واحد تلمبه-ذخیره‌ای در ساختار ABT

۴- فرمول بندی روش پیشنهادی

در این مقاله از یک روش بهینه سازی جدید برای حداکثر کردن سود سیستم هیبریدی متشکل از مزارع بادی، منابع فتوولتائیک و واحد تلمبه-ذخیره‌ای متصل به ریزشبکه استفاده شده است. هدف از اجرای این روش این است که سیستم هیبریدی در هر بازه‌ی زمانی طبق قرارداد تعیین شده انرژی خود را تحویل شبکه دهد. اما به علت وجود منابع تولید پراکنده ممکن است در برخی از ساعات تولید سیستم هیبریدی نسبت به مقدار برنامه‌ریزی شده کمتر و یا بیشتر شود، که این میزان اختلاف بر روی فرکانس سیستم تاثیر گذاشته و همچنین باعث ایجاد انرژی برنامه‌ریزی نشده می‌شود.

۴-۱- محاسبه‌ی تغییرات فرکانس

به منظور کاهش مقدار تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده (UI) مابین سیستم هیبریدی و شبکه‌ی قدرت از محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس استفاده خواهیم کرد. هرچقدر مقدار تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده کمتر باشد، میزان جریمه‌ی تعلق گرفته برای سیستم هیبریدی کاهش خواهد یافت و در نتیجه سود سیستم افزایش خواهد یافت. علاوه بر افزایش سود، با کاهش مقدار (UI) فرکانس سیستم نیز بهبود خواهد یافت. ثبات موجود در فرکانس سیستم از جمله پارامترهای مهم مورد نظر مشتریان برای انتخاب تولیدکنندگان انرژی در بازار رقابتی می‌باشد.

ارتباط میان عملکرد سیستم هیبریدی با این محیط قیمت‌گذاری بر پایه‌ی فرکانس، بر اساس جزء سوم تشکیل دهنده‌ی ساختار ABT بیان می‌شود. برای استفاده از این ساختار باید در هر بازه‌ی زمانی تشکیل دهنده‌ی بازار برق روز-پیش میزان تغییرات فرکانس نسبت به مقدار پایه‌ی آن مشخص شود. در این مقاله مقدار پایه‌ی فرکانس ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن مقدار فرکانس، بر اساس شکل ۱ مقدار هزینه‌ی اختصاص یافته به انرژی برنامه‌ریزی نشده محاسبه خواهد شد. فرکانس سیستم برای هر سناریو و برای هر ساعت در بازار روز-پیش طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۸].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

$$f_{s,t} = 50 - \frac{P_t^D - (\sum_n P_{t,n}^{CG} + P_{s,t}^W + P_{s,t}^{PV} + \eta_h \times P_{s,t}^H - P_{s,t}^P)}{(PFR \times P_t^D)} \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \quad n = 1,2,3,... \tag{۱}$$

در رابطه فوق، n نشان دهنده تعداد ژنراتورهای مرکزی؛ T بیانگر بازه‌ی زمانی یک روزه؛ s نشان‌دهنده تعداد سناریوهای مورد استفاده برای توان تولیدی منابع بادی و فتوولتائیک؛ $P_{t,n}^{CG}$ توان اکتیو خروجی از هر ژنراتور مرکزی در هر ساعت از بازار روز-پیش (بر حسب MW)؛ P_t^D تقاضای توان اکتیو در هر ساعت (بر حسب MW)؛ $P_{s,t}^W, P_{s,t}^{PV}$ به ترتیب توان اکتیو خروجی سیستم فتوولتائیک و سیستم بادی در هر ساعت و به ازای هر سناریو (بر حسب MW)؛ $P_{s,t}^H, P_{s,t}^P$ به ترتیب میزان پمپاژ و تولید واحد تلمبه-ذخیره‌ای در هر ساعت و به ازای هر سناریو (بر حسب MW)؛ η_h ضریب بهره‌وری واحد تلمبه-ذخیره‌ای در زمان تولید انرژی می باشند. مقدار PFR (نسبت افت فرکانس) به صورت تجربی و از طریق انجام آزمایش‌های مختلف بر روی سیستم مورد مطالعه به دست می‌آید. در این مقاله این مقدار برابر با ۴% در نظر گرفته شده است.

۴-۲- تابع هدف

تابع هدف ارائه شده در این مقاله، در رابطه (۲) نشان داده شده است. این تابع هدف، سود حاصل از تامین انرژی شبکه توسط سیستم هیبریدی را در هر بازه‌ی زمانی بیشینه می‌کند. با توجه به عدم قطعیت در پیش بینی تولید واحدهای بادی و خورشیدی این تابع هدف بر مبنای سناریوهای مختلف ارائه شده است.

$$Max: \quad EPF = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \rho_s \times PF(s,t) \tag{۲}$$

در رابطه (۲) ρ_s احتمال وقوع سناریوی sام؛ S مجموعه سناریوها؛ EPF ارزش سود مورد انتظار سیستم هیبریدی را نشان می‌دهند.

میزان سود دریافتی سیستم با تابع $PF(s,t)$ نمایش داده می‌شود. بهینه‌سازی انجام گرفته بر روی تابع هدف به منظور بیشینه کردن مقدار سود سیستم است. برای سیستم هیبریدی شامل مزارع بادی، سیستم فتوولتائیک و واحد تلمبه-ذخیره‌ای نحوه‌ی برنامه‌ریزی و فرمول‌بندی تابع $PF(s,t)$ به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$PF(s,t) = \sum_s \sum_t (C_{s,t}^{SL} + C_{s,t}^{PS} - C_{s,t}^{PPL} - C_{s,t}^{PPP}) \tag{۳}$$

همانطور که در رابطه‌ی بالا نشان داده شده است، مقدار $PF(s,t)$ از چهار قسمت مختلف تشکیل شده است که در ادامه به توضیح این چهار قسمت می‌پردازیم.

سیستم هیبریدی بر اساس قرارداد تعیین شده باید در هر بازه‌ی زمانی انرژی متعهد شده‌ی خود را به شبکه تحویل دهد. $C_{s,t}^{SL}$ بیانگر درآمد حاصل از توان فروخته شده سیستم هیبریدی به شبکه در هر بازه‌ی زمانی، بر اساس برنامه‌ریزی قبلی و قرارداد بسته شده و به ازای هر سناریو می‌باشد. این کمیت بر حسب ($) بیان می‌شود. درآمد حاصل از این انرژی بر اساس قیمت بازار روز-پیش طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$C_{s,t}^{Sl} = C_t \times P_{s,t}^{HS}, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۴}$$

$$P_{s,t}^{HS} = P_{s,t}^W + P_{s,t}^{PV} + P_{s,t}^H, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۵}$$

در این رابطه C_t بیانگر قیمت بازار روز-پیش در هر بازه‌ی زمانی و $P_{s,t}^{HS}$ بیانگر مجموع توان تولید شده‌ی سیستم هیبریدی به ازای هر سناریو در هر بازه‌ی زمانی است.

سیستم هیبریدی برای کسری تولید خود هزینه‌ای را به عنوان جریمه پرداخت خواهد کرد و همچنین برای تولید مازاد خود هزینه‌ی اضافه‌ای از شبکه دریافت می‌نماید. این تبادل انرژی خارج از برنامه‌ریزی قبلی و تعهدات انجام گرفته می‌باشد. این میزان مبادله‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده بر روی فرکانس سیستم نیز تاثیر خواهد گذاشت. همانطور که گفته شد، به منظور بهبود فرکانس سیستم و افزایش سود سیستم، این هزینه در ساختار ABT بر اساس فرکانس سیستم در هر لحظه تعیین خواهد شد. $C_{s,t}^{PS}, C_{s,t}^{PPL}$ به ترتیب بیانگر هزینه‌ی توان اضافی خریداری شده از شبکه جهت تامین تقاضا و درآمد حاصل از فروش توان مازاد به شبکه نسبت به مقدار برنامه‌ریزی شده در هر بازه‌ی زمانی و به ازای هر سناریو می‌باشد. این کمیت‌ها بر حسب ($) بیان می‌شوند. طبق روابط (۶) و (۷)، مقدار هزینه‌ی کمبود یا اضافه تولید به مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده بستگی دارد.

$$C_{s,t}^{PS} = UI_{s,t}^{PS} \times Rate^{UI_{s,t}}, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۶}$$

$$C_{s,t}^{PPL} = UI_{s,t}^{PPL} \times Rate^{UI_{s,t}}, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۷}$$

در این روابط، $UI_{s,t}^{PS}$ و $UI_{s,t}^{PPL}$ به ترتیب بیانگر توان مازاد فروخته شده به شبکه و توان اضافی خریداری شده از شبکه جهت تامین تقاضا در هر بازه‌ی زمانی و به ازای هر سناریو است و بر حسب (MW) بیان می‌شوند. همچنین $Rate^{UI_{s,t}}$ بیانگر هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده بر حسب ($/MWh) برای هر بازه‌ی زمانی و به ازای هر سناریو می‌باشد.

در ساختار محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس واحد تلمبه-ذخیره‌ای علاوه بر کارکرد نسبت به حالت عادی خود، در ساعات افت قیمت بازار با دریافت توان از شبکه آب را به داخل مخزن پمپاژ می‌کند. از آنجایی که این توان نیز خارج از برنامه‌ریزی انجام شده‌ی قبلی است، پس مقدار هزینه پرداختی بابت پمپاژ به مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده بستگی خواهد داشت. $C_{s,t}^{PPP}$ بیانگر هزینه‌ی پرداخت شده از طرف سیستم هیبریدی بابت خرید توان از شبکه برای پمپاژ آب در هر بازه‌ی زمانی و به ازای هر سناریو می‌باشد و بر حسب ($) بیان می‌شود. رابطه (۸) نحوه‌ی محاسبه‌ی این هزینه را نشان می‌دهد.

$$C_{s,t}^{PPP} = UI_{s,t}^{PPP} \times Rate^{UI_{s,t}}, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۸}$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

در این رابطه، $UI_{s,t}^{PPP}$ بیانگر توان خریداری شده از شبکه جهت پمپاژ آب در هر بازه‌ی زمانی و به ازای هر سناریو می‌باشد و بر حسب (MW) بیان می‌شود.

۴-۳- محدودیت‌ها

قیودی که برای انجام این فرآیند بهینه سازی اعمال شده‌اند در معادلات زیر نشان داده شده‌اند:

- قید توازن توان اکتیو و راکتیو در هر شین

در هر ساعت از بازار روز-پیش، کل تولید سیستم باید پاسخگوی تقاضای کل و تلفات سیستم باشد. در روابط (۹) و (۱۰) مقدار توان اکتیو و راکتیو تولید شده نشان داده شده‌است.

$$P_{s,t}^{HS} + \sum_{n} P_{t,n}^{CG} - P_t^D - \sum_{j=1}^{m} |V_i||V_j| \times \left\{ G_{ij}cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}sin(\theta_i - \theta_j) \right\} = 0, \quad \forall t \in T \tag{۹}$$

$$Q_{s,t}^{HS} + \sum_{n} Q_{t,n}^{CG} - Q_t^D - \sum_{j=1}^{m} |V_i||V_j| \times \left\{ G_{ij}sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}cos(\theta_i - \theta_j) \right\} = 0, \quad \forall t \in T \tag{۱۰}$$

- قید ژنراتورهای مرکزی

در هر ساعت، بار کل سیستم توسط سیستم هیبریدی و ژنراتورهای مرکزی تامین خواهد شد. اما تولید هر ژنراتور باید در محدوده‌ی مجاز عملکرد واحد قرار گیرد.

$$P_{t,n}^{CG,min} \le P_{t,n}^{CG} \le P_{t,n}^{CG,max}, \quad \forall t \in T \tag{۱۱}$$

- محدودیت انرژی برنامه‌ریزی نشده

در هر بازه‌ی زمانی مقدار انرژی برنامه‌ریزی نشده باید از حد بیشینه‌ی خود کمتر باشد و از آن تجاوز نکند.

$$UI_{t,s} \le UI^U, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۱۲}$$

- محدودیت‌های واحد تلمبه-ذخیره‌ای

$$E_{s,t+1} = E_{s,t} + (\eta_p P_{s,t}^P - \frac{P_{s,t}^H}{\eta_h}), \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۱۳}$$

$$E^L \le E_{s,t} \le E^U, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۱۴}$$

$$P^{H,L} \le P_{s,t}^H \le min(P^{H,U}, \eta_h \frac{E_t}{t}), \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۱۵}$$

$$P^{P,L} \le P_{s,t}^P \le P^{P,U}, \quad \forall t \in T, \ \forall s \in S \tag{۱۶}$$

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در برنامه‌ریزی‌های انجام گرفته بر روی واحد تلمبه-ذخیره‌ای باید محدودیت‌های تولید و پمپاژ و همچنین ظرفیت مخزن به طور دقیق مشخص باشد. طبق رابطه (۱۳) انرژی ذخیره شده در مخزن واحد تلمبه-ذخیره‌ای در زمان $t+1$ به میزان انرژی موجود در مخزن در زمان t و همچنین به میزان آب پمپاژ شده به داخل مخزن و یا تولید انرژی و تحویل آن به شبکه در زمان t بستگی دارد. میزان حداکثر و حداقل ظرفیت مخزن باید مشخص باشد و در هر بازه‌ی زمانی انرژی ذخیره شده باید در این محدوده قرار گیرد. همچنین در هر بازه‌ی زمانی میزان تولید یا پمپاژ واحد باید در محدوده‌ی مجاز خود قرار گیرد. روابط (۱۴) و (۱۶) نشان دهنده این موضوع می‌باشند.

در روابط (۹) تا (۱۶) پارامترها به شرح زیر تعریف می‌شوند:

i, j	باس‌بارهای سیستم
m	تعداد کل باس‌بارها
Bij, Gij	سوسپتانس و کندوکتانس مابین باس i و j
$P^{CG,\max}, P^{CG,\min}$	حداکثر و حداقل مقدار قابل تولید توان توسط ژنراتورهای مرکزی(MW)
$Q_{s,t}^{HS}$	مجموع توان راکتیو تولید شده سیستم هیبریدی در ساعت و به ازای هر سناریو (MVAR)
Q_t^D	تقاضای توان راکتیو در هر ساعت(MVAR)
$Q_{t,n}^{CG}$	توان راکتیو خروجی از ژنراتورهای مرکزی در هر ساعت (MVAR)
θ_i, θ_j	زاویه ولتاژ مابین باس i و j
$UI_{t,s}$	انرژی برنامه‌ریزی نشده در هر ساعت و به ازای هر سناریو (MW)
UI^U	حداکثر انرژی برنامه‌ریزی نشده مجاز در هر ساعت (MW)
Es,t	سطح انرژی ذخیره شده در مخزن در هر ساعت و به ازای هر سناریو (MW h)
EU, EL	حداکثر و حداقل میزان انرژی قابل ذخیره در مخزن (MW h)
$P^{H,L}, P^{H,U}$	حداکثر و حداقل تولید توان توسط واحد تلمبه – ذخیره‌ای(MW)
$P^{P,L}, P^{P,U}$	حداکثر و حداقل میزان پمپاژ توان توسط واحد تلمبه –ذخیره‌ای(MW)
η_p, η_H	ضریب بهره برداری از واحد تلمبه-ذخیره‌ای در زمان پمپاژ و تولید

۵- شبیه‌سازی و نتایج

به منظور تست قابلیت روش پیشنهادی، روابط بیان شده بر روی یک شبکه‌ی آزمون ۱۰ شینه اعمال شده‌اند. سیستم آزمایشی در قسمت ۵-۱ معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی در قسمت ۵-۲ ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به وجود قیود غیرخطی و متغیر عدد صحیح در مسئله‌ی بهینه‌سازی، تابع هدف با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP[۶]) در نرم افزار GAMS بهینه‌سازی شده است. با توجه به اینکه DICOPT یکی از حل‌کننده‌های قدرتمند مسائل MINLP می‌باشد، از این حل‌کننده برای بهینه‌سازی تابع هدف مورد نظر در نرم افزار GAMS استفاده شده است [۱۹].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

در این مقاله، بهینه‌سازی با توجه به مقادیر توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت این منابع، سطح انرژی اولیه‌ی موجود در مخزن واحد تلمبه-ذخیره‌ای، مقدار اولیه‌ی فرکانس، بار متصل به سیستم و قرارداد بسته شده با شبکه شروع می‌شود. بر اساس این پارامترها و روش ارائه شده، توسط بهینه‌سازی انجام گرفته نحوه‌ی عملکرد بهینه‌ی واحد تلمبه-ذخیره‌ای و همچنین عملکرد سیستم هیبریدی در جهت به حداکثر رساندن سود دریافتی تحت محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس در طول بازار روز-پیش تعیین می‌گردد. تمامی قسمت‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن میزان انرژی اولیه‌ی 60 MWh در مخزن واحد تلمبه-ذخیره‌ای انجام داده شده است.

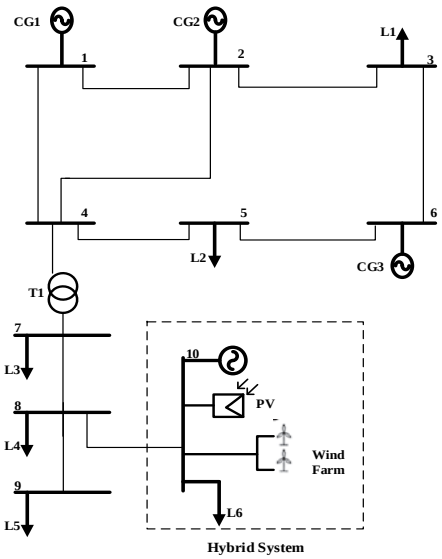
۵-۱- سیستم مورد مطالعه

شکل ۳ پیکربندی سیستم تحت مطالعه استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد. این سیستم دارای ۶ باس انتقال و ۴باس توزیع می‌باشد. ارتباط بین قسمت توزیع و انتقال سیستم از طریق یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۱۰۰MVA صورت گرفته است. قیود توازن توان ذکر شده در بخش چهارم برای کل سیستم اعمال شده‌اند. همچنین شین ۱ به عنوان شین اسلک در نظر گرفته شده است. سیستم هیبریدی مورد نظر به باس ۱۰ متصل شده است. سیستم مورد مطالعه دارای سه ژنراتور مرکزی CG_1، CG_2 و CG_3 به ترتیب با ظرفیت ۲۲۰MW، ۱۰۰MW و ۲۰MW می‌باشد.

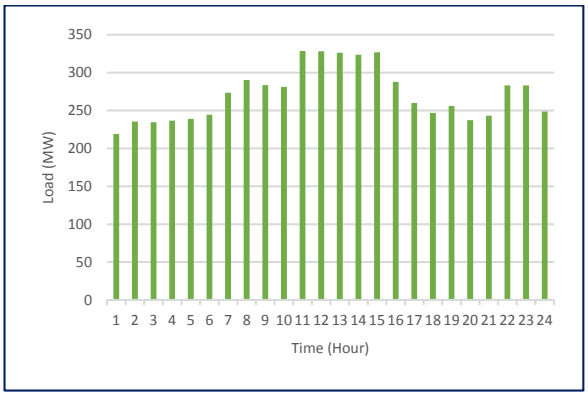
سیستم مورد نظر شامل یک مزرعه‌ی بادی متشکل از ۳۶ واحد با ظرفیت هر کدام ۱/۸ MW و ظرفیت کل ۶۴/۸ MW می‌باشد. توربین‌های بادی به صورت سرعت ثابت فرض شده‌اند. علاوه بر مزرعه بادی، از یک واحد فتوولتائیک با ظرفیت ۵/۴۸ MW نیز استفاده شده است. برای این سیستم یک واحد نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای با ظرفیت تولید و پمپاژ در محدوده‌ی ۱/۵ تا ۱۵ مگاوات و یک مخزن جهت ذخیره‌سازی آب متناسب با منابع بادی و فتوولتائیک سیستم، با حداکثر ظرفیت ۶۰ مگاوات ساعت و حداقل ظرفیت ۶ مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است [۲۰، ۲۱]. مشخصات کامل‌تر مربوط به سیستم در [۲۱] آمده است.

در انجام شبیه‌سازی مقدار انرژی اولیه‌ی موجود در مخزن واحد تلمبه- ذخیره‌ای را برابر با ۶۰ مگاوات ساعت در نظر می‌گیریم. یعنی تمامی نتایج به دست آمده به ازای حداکثر ظرفیت اولیه‌ی مخزن می باشند. منحنی بار سیستم برای ۲۴ ساعت به ازای تمامی بارهای متصل به باس‌بارهای شبکه و همچنین قیمت پیش‌بینی شده‌ی بازار روز-پیش به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده‌اند [۲۲].

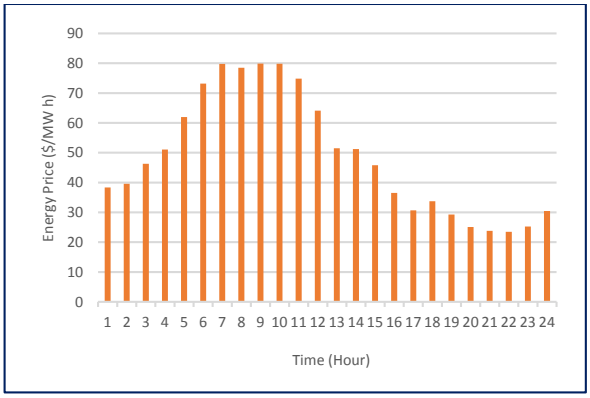
تابع هدف پیشنهادی بر مبنای برنامه‌ریزی تصادفی طراحی شده است و برای سناریوهای مختلف اجرا خواهد شد. هدف از ایجاد سناریوهای مختلف، در نظر گرفتن تولید توان نوسانی و احتمالاتی منابع تجدیدپذیر می‌باشد.



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه [۲۱]



شکل (۴): منحنی بار ۲۴ ساعته کل سیستم مورد مطالعه



شکل (۵): قیمت بازار روز-پیش [۲۲]

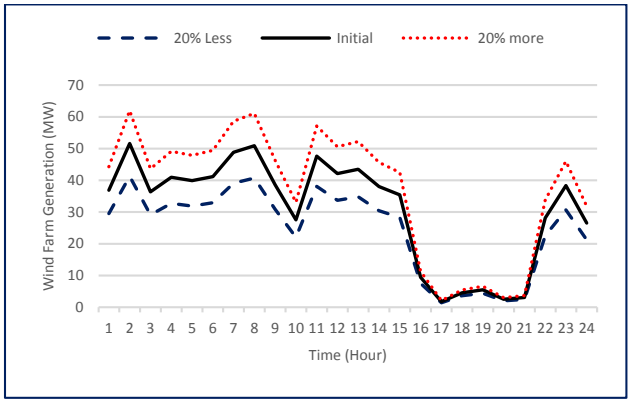
معمولاً تغییرات تولید واقعی منابع تجدیدپذیر در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد مقدار پیش‌بینی شده‌ی روز قبل است. برای بررسی تغییرات ایجاد شده در توان خروجی منابع تجدیدپذیر و ایجاد سناریوهای مختلف برای توان تولید شده‌ی این منابع، علاوه بر مقادیر پیش‌بینی شده‌ی اولیه برای توان خروجی مزرعه‌ی بادی و سیستم فتوولتائیک، مقادیر ۲۰ درصد بیشتر و کمتر از مقدار اولیه‌ی پیش‌بینی توان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

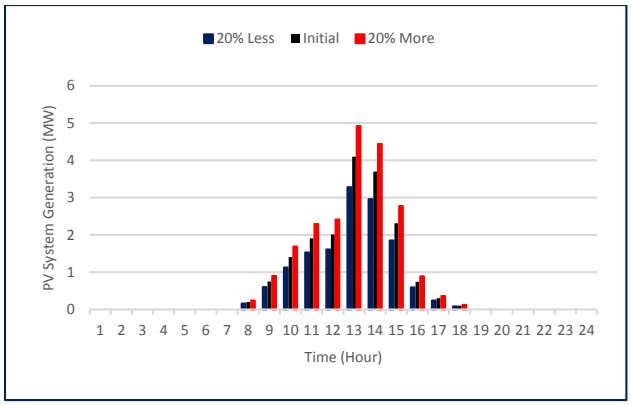
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

خروجی این منابع، به عنوان سه سناریوی مختلف توان تولیدی در نظر گرفته شده است. این سه سناریو برای هر کدام از سیستم‌های بادی و فتوولتائیک به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. احتمال وقوع این سه سناریو نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

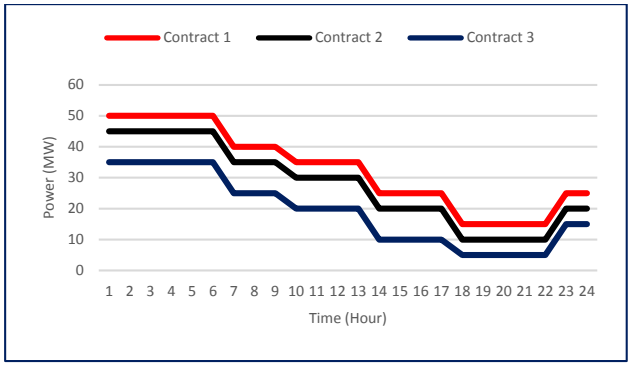
برای نشان دادن میزان تاثیر قرارداد بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه بر روی سود سیستم هیبریدی، الگوریتم ارائه شده در این مقاله برای سه قرارداد پیش فرض مختلف انجام گرفته است. این قراردادها در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مقدار قرارداد اول ۷۸۵ مگاوات ساعت، قرارداد دوم ۶۶۵ مگاوات ساعت و قرارداد سوم ۴۶۰ مگاوات ساعت می‌باشد. با توجه به سناریوهای ارائه شده برای توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی، میزان پیروی قرارداد اول از پروفیل‌های توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی ۷۰ درصد، قرارداد دوم ۵۵ درصد و قرارداد سوم ۳۵ درصد می‌باشد. بنابراین نزدیکترین و منطبق‌ترین قرارداد نسبت به پروفیل توان تولیدی منابع تجدیدپذیر قرارداد اول می‌باشد. در ادامه تاثیر میزان این قراردادها بر روی سود سیستم بررسی خواهد شد.



شکل (۶): سناریوهای استفاده شده برای توان تولیدی نیروگاه بادی



شکل (۷): سناریوهای استفاده شده برای توان تولیدی سامانه فتوولتائیک



شکل (۸): قراردادهای بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه

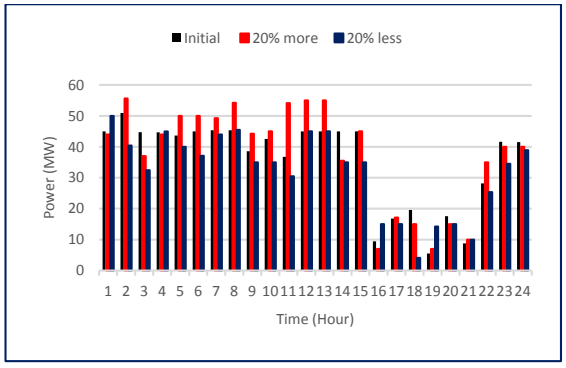
جدول (۱): سناریوهای تولید توان و احتمال آن‌ها

شماره سناریو بادی و فتوولتائیک	احتمال
توان اولیه	۰/۶۸
۲۰ درصد کمتر از توان اولیه	۰/۱۶
۲۰ درصد بیشتر از توان اولیه	۰/۱۶

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای قرارداد اول مورد بحث قرار می‌گیرد.

با توجه به مقدار قرارداد اول در طول ۲۴ ساعت، سیستم هیبریدی تلاش می‌کند تا انرژی متعهد شده را به شبکه تحویل دهد. اما در برخی از ساعات به علت وجود عدم قطعیت در تولید منابع بادی و خورشیدی میزان انرژی تحویلی با مقدار قرارداد بسته شده یکسان نمی‌باشد. در شکل ۹ برای قرارداد اول، میزان توان تحویلی سیستم هیبریدی به شبکه برای هر سناریو و در طول بازار روز-پیش نشان داده شده است.



شکل (۹): توان تحویلی به شبکه طبق قرارداد ۱ به ازای هر سناریو

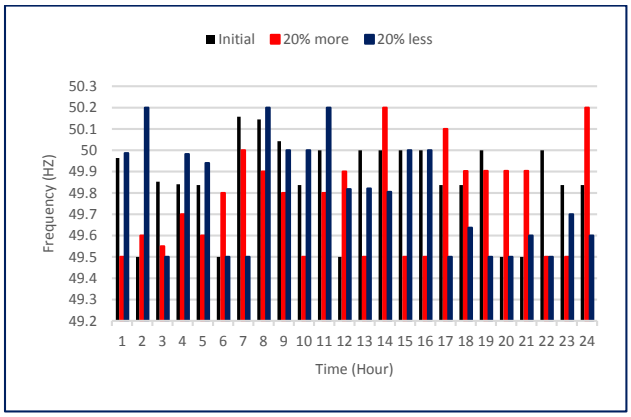
با توجه به تولید سیستم هیبریدی و قرارداد بسته شده، ممکن است میزان انرژی برنامه‌ریزی نشده سیستم مثبت و یا منفی باشد. مقادیر مثبت بیانگر توان مازاد تحویلی به شبکه نسبت به قرارداد بسته شده و مقادیر منفی نیز بیانگر کسری توان تحویلی سیستم هیبریدی به شبکه بر اساس قرارداد از پیش تعیین شده می‌باشد. میزان هزینه‌ی تعلق گرفته به توان برنامه‌ریزی نشده طبق ساختار ABT تعیین خواهد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

شد. در ساعت‌هایی که سیستم هیبریدی به قرارداد بسته شده با شبکه عمل می‌کند، میزان هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده صفر خواهد بود. اما در بیشتر ساعات توان تولیدی سیستم هیبریدی از مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی قبلی منحرف شده است.

برای تعیین هزینه‌ی تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده طبق ساختار ABT ابتدا فرکانس سیستم را طبق معادله (۱) برای بازه‌های مختلف محاسبه شده است. سپس از طریق نمودار ارائه شده در شکل ۱ میزان هزینه‌ی تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده به دست می‌آید. طبق این نمودار برای فرکانس‌های بالاتر از ۵۰ هرتز چندان هزینه‌ای به انرژی برنامه‌ریزی نشده تعلق نمی‌گیرد. پس بهتر است سیستم قرارداد بسته شده را طوری تعیین کند که تا حد ممکن ظرفیت تولیدی خود را با قیمت بازار به فروش برساند. بدین ترتیب سود سیستم نیز رشد چشمگیری خواهد داشت. فرکانس سیستم به ازای تمامی سناریوها و برای بازه‌های زمانی بازار روز-پیش محاسبه گردیده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق شکل در بیشتر حالت‌ها میزان فرکانس نزدیک به حالت پایه‌ی ۵۰ هرتز است. در زمان‌هایی که فرکانس از مقدار پایه‌ی خود بیشتر یا کمتر می‌شود، به نسبت همان مقدار میزان هزینه‌ی تبادل انرژی برنامه‌ریزی نشده نیز محاسبه می‌شود. در زمان‌های افزایش فرکانس نسبت به مقدار پایه، شاهد کاهش هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده به همان نسبت خواهیم بود و برعکس این موضوع نیز بر سیستم حاکم می‌باشد.



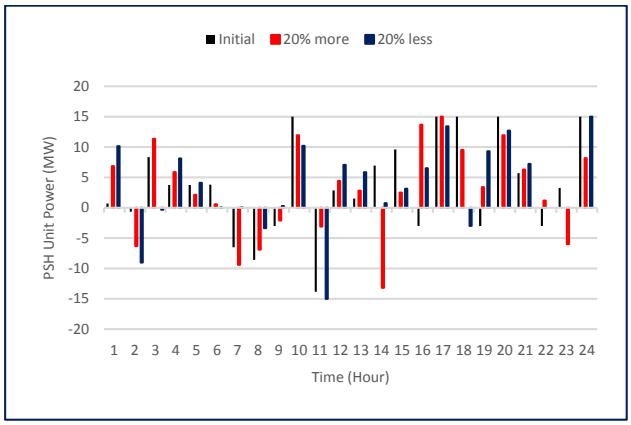
شکل (۱۰): فرکانس سیستم طبق قرارداد ۱ به ازای هر سناریو

از واحد تلمبه-ذخیره‌ای نیز برای افزایش سود سیستم و کاهش نامتعادلی‌های توان خروجی استفاده کرده‌ایم. در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس با توجه به مقدار محاسبه شده‌ی فرکانس در انتهای هر بازه‌ی زمانی (t)، مُد کاری واحد تلمبه-ذخیره‌ای برای بازه‌ی زمانی بعدی (t+1) طبق شکل ۲ تعیین می‌گردد. عملکرد این واحد تحت محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس سیستم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

این واحد در زمان‌هایی که قیمت بازار در محدوده‌ی پایین قرارداد و یا توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی نسبت به مقدار برنامه‌ریزی شده بیشتر است، با پمپاژ آب به داخل مخزن انرژی را ذخیره سازی می‌کند.همچنین در ساعاتی که قیمت بازار در محدوده‌ی بالاتری نسبت به حالت قبل قرار دارد و یا توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی کمتر از میزان برنامه‌ریزی شده است، با تزریق توان به شبکه، نامتعادلی‌ها کنترل شده و باعث افزایش سود سیستم هیبریدی می‌شود.

مقادیر مثبت نشان داده شده در شکل بیانگر زمان‌هایی است که واحد تلمبه-ذخیره‌ای در وضعیت تولید انرژی است و مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی زمان‌هایی است که واحد تلمبه-ذخیره‌ای در وضعیت پمپاژ می‌باشد.

نتایج مربوط به سود سیستم برای هر سه سناریو و برای سه قرارداد بسته شده‌ی متفاوت، در شکل۱۲ نشان داده شده‌اند. مجموع فروش توان برنامه‌ریزی شده و توان مازاد سیستم هیبریدی به شبکه از هزینه‌ی پرداختی بابت خرید توان جهت تامین بارها و پمپاژ آب به مخزن کم شده و سود سیستم برای هر سناریو تعیین شده است. این نتایج، تاثیر مقدار قرارداد بسته شده و سناریوی مورد استفاده را بر میزان سود سیستم هیبریدی نشان می‌دهند.

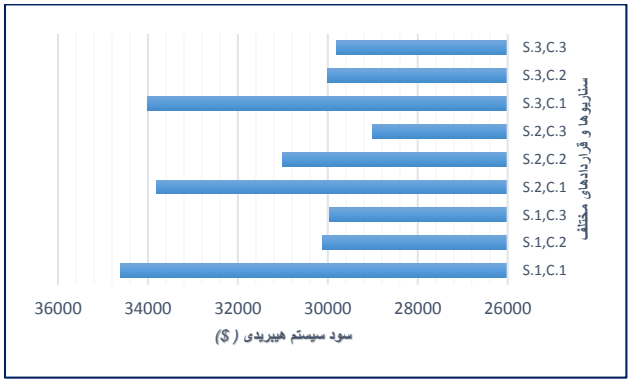


شکل (۱۱): عملکرد واحد تلمبه- ذخیره‌ای به ازای هر سناریو

ملاحظه می‌شود که در روش پیشنهادی با اعمال قوانین موجود در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس، عملکرد سیستم هیبریدی بهبود یافته و نوسانات فرکانس سیستم نسبت به سایر روش‌های بهره‌برداری کمتر شده است. این امر سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم هیبریدی شده و مشترکین به سمت استفاده از این سیستم‌ها بیش از پیش روی می‌آورند. همچنین طبق شکل ۱۲ سود سیستم هیبریدی کاملاً تحت تاثیر قراردادهای بسته شده با ریزشبکه می‌باشد. که این بیانگر درستی فرضیه‌ی این مقاله نسبت به سایر مقالات، که مطالعات خود را بر پایه‌ی یک قرارداد پیش فرض انجام می‌دهند، می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]



شکل (۱۲): سود سیستم هیبریدی برای سه قرارداد و سه سناریوی مطرح شده

طبق نتایج به دست آمده بیشترین سود دریافتی در هر سه سناریو مربوط به قرارداد اول می‌باشد. دلیل این امر انطباق بیشتر این قرارداد ساعتی نسبت به پروفیل توان تولیدی منابع بادی و فتوولتائیک است. بنابراین هر چقدر میزان قرارداد بسته شده مابین سیستم هیبریدی و ریزشبکه پیرو میزان تولید منابع تجدیدپذیر باشد سود سیستم نیز به همان اندازه افزایش خواهد یافت.

همانطور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، از محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس جهت تعیین هزینه انرژی برنامه‌ریزی نشده و تعیین مُد کاری واحد تلمبه-ذخیره‌ای استفاده شد. برای نشان دادن تاثیرات این محیط قیمت‌گذاری، از مدل ارائه شده در [۲۳] برای تعیین هزینه انرژی برنامه‌ریزی نشده استفاده شده است. این روش تعیین هزینه عدم تعادلی فقط با در نظر گرفتن قرارداد اول بررسی شده است. در این حالت از فرکانس محاسبه شده در انتهای هر بازه تنها برای تعیین مُد کاری واحد تلمبه-ذخیره‌ای در بازه زمانی بعدی استفاده شده است. نتایج مربوط به مقایسه سود دریافتی سیستم هیبریدی برای دو حالت ذکر شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول (۲): مقایسه سود سیستم هیبریدی در دو حالت مختلف

شماره سناریوها	سود دریافتی سیستم هیبریدی ($)	
	حالت دوم: تعیین هزینه عدم تعادلی طبق روش ارائه شده در مرجع [۲۳]	حالت اول: تعیین هزینه عدم تعادلی طبق محیط قیمت گذاری بر اساس فرکانس
S.1	۳۲۷۸۰	۳۴۶۰۵
S.2	۳۰۶۰۰	۳۳۸۰۰
S.3	۲۹۱۰۰	۳۴۰۰۰

مقادیر به‌دست آمده برای سود سیستم هیبریدی در حالت اول نسبت به حالت دوم حاکی از تاثیرگذاری محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس بر روی عملکرد بهتر سیستم هیبریدی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت واضح بیانگر کارآمدی روش پیشنهادی می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به ارائه مدلی نوین برای بیشینه کردن سود سیستم هیبریدی متصل به یک ریزشبکه در محیط قیمت‌گذاری بر اساس فرکانس می‌پردازد. در مدل پیشنهادی، با توجه به ماهیت تصادفی منابع تولید پراکنده، جهت حل مسئله‌ی بهینه سازی از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شد. مدل ارائه شده از طریق نرم افزار GAMS بر روی یک شبکه‌ی تست متداول پیاده‌سازی شده است. عدم قطعیت‌هایی نظیر توان در دسترس نیروگاه‌های بادی و خورشیدی با توجه به عدم قطعیت باد و خورشید در این مقاله در نظر گرفته شده است.

در برخی از ساعات بازار روز-پیش ممکن است توان ارائه شده به شبکه از میزان قرارداد بسته شده کمتر و یا بیشتر باشد و توان برنامه‌ریزی نشده را به وجود آورد. برای کاهش مقدار توان برنامه‌ریزی نشده و همچنین بهبود فرکانس از ساختار ABT جهت تعیین هزینه‌ی انرژی برنامه‌ریزی نشده استفاده شده است. در این ساختار واحد تلمبه-ذخیره‌ای علاوه بر کمک به کاهش مقدار توان برنامه‌ریزی نشده، با ذخیره کردن آب در ساعاتی که قیمت برق در رنج پایین‌تری قرار دارد و سپس با تزریق توان به شبکه در ساعات اوج قیمت سود سیستم هیبریدی را افزایش می‌دهد. سود سیستم هیبریدی به مقدار قرارداد بسته شده توسط سیستم و شبکه وابسته است. به همین منظور سود سیستم برای قراردادهای مختلف محاسبه شده است و بیشترین سود ممکن از قرارداد منطبق‌تر با پروفیل توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی حاصل گردید. نتایج به دست آمده، کارآمدی روش پیشنهادی را در افزایش سود سیستم هیبریدی و کاهش نوسانات فرکانس به طور کامل نشان می‌دهند.

مراجع

[1] Verma, Y. P., Kumar, A., "*Potential impacts of emission concerned policies on power system operation with renewable energy sources*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 44, pp. 520-529, 2013.

[2] Nikolova, S., Causevski, A., Al-Salaymeh, A., "*Optimal operation of conventional power plants in power system with integrated renewable energy sources*", Energy Conversion and Management, vol. 65, pp. 697-703, 2013.

[3] Aghaei, J., Niknam, T., Azizipanah-Abarghooee, R., "*Scenario-based dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 47, pp. 351-367, 2013.

[4] Ma, T., Yang, H., Lu, L., "*Feasibility study and economic analysis of pumped hydro storage and battery storage for a renewable energy powered island*", Energy Conversion and Management, vol. 79, pp. 387-397, 2014.

[5] Castronuovo, E. D., Lopes, J. A., "*On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant*", IEEE Transactions on Power System, vol. 19, pp. 1599-1606, 2004.

[6] Anagnostopoulos, J. S., Papantonis, D. E., "*Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy*", Renewable Energy, vol. 33, pp. 1685-1694, 2008.

[7] González, J. G., Santos, L. M., González, A. M., "*Stochastic joint optimization wind generation and pumped-storage units in an electricity market*", IEEE Transactions on Power System, vol. 23, pp. 460-468, 2008.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]

[8] Javadi, M., Moghaddam, S., Marzband, M., "*Optimal energy management of microgrids in the retail market based on non-cooperative game theory considering the uncertainty*", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 46, no. 1, pp. 63-74, 2016.

[9] Valinejad, J., Barforoshi, T., "*Evaluating the impacts of incentives on generation capacity investment under uncertainties in electricity markets*", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 46, no. 1, pp. 357-368, 2016.

[10] Kabalci, E., "*Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power*", Energy Conversion and Management, vol. 72, pp. 51-59, 2013.

[11] Papalexopoulos, A. D., Andrianesis, P. E., "*Performance-based pricing of frequency regulation in electricity markets*", IEEE Transactions on Power systems, vol. 29, pp. 441-449, 2014.

[12] Guo, Y., Yu, D., "*The influence of interconnection of electric power systems on load characteristic and frequency regulation*", Electric Power Systems Research, vol. 70, pp. 23-29, 2004.

[13] Zhong, J., Bhattacharya, K., "*Frequency linked pricing as an instrument for frequency regulation in deregulated electricity markets*", IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 2003.

[14] Zhao, P., Hanze, G. P., Plamp, S., Cushing, V. J., "*Evaluation of commercial building HVAC systems as frequency regulation providers*", Energy and Buildings, vol. 67, pp. 225-235, 2013.

[15] Deshmukh, S. R., Doke, D. J., Nerkar, Y. P., "*Optimal generation scheduling under ABT using forecasted load and frequency*", in Power System Technology and IEEE Power India Conference, pp. 1-6, Oct 2008.

[16] Central Electricity Regulatory Commission. Unscheduled interchange charges and related matters regulation, 2009. CERC, New Delhi, India. < http:// www.cerc. gov .in >.

[17] Malakar, T., Goswami, S. K., Sinha, A. K., "*Optimum scheduling of micro grid connected wind-pumped storage hydro plant in a frequency based pricing environment*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 54, pp. 341-351, 2014.

[18] Venkatesh, B., Geetha, T., Jayashankar, V., "*Frequency sensitive unit commitment with availability-based tariff: an indian example*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 5, pp. 798-805, 2011.

[19] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., GAMS, A., "*A User's Guide*", GAMS Development Corporation, 1998.

[20] Kapsali, M., Anagnostopoulos, J. S., Kaldellis, J. K., "*Wind powered pumped-hydro storage systems for remote islands: a complete sensitivity analysis based on economic perspectives*", Applied Energy, vol. 99, pp. 430-444, 2012.

[21] Wang, J., Shahidehpour, M., Li, Z., "*Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, pp. 1319-1327, 2008.

[22] ISO New England, http://www.iso-ne.com./isoexpress/web/ reports/pricing/-/tree/lmp-by-node.

[23] Parastegari, M., Hooshmand, R., Zare, A. H., "*Optimal scheduling and risk minimization of wind farms using pump-storage plants*", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 41, no. 2, pp. 51-59, 2012.

زیرنویس‌ها

[1] Microgrid
[2] Photovoltaic
[3] Pumped storage hydro unit
[4] Frequency based pricing
[5] Unscheduled Interchange
[6] Mixed Integer Nonlinear Programming

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.6.3]