برنامه‌ریزی عملکرد یکپارچه ریزشبکه با در نظر گرفتن ذخیره چرخان و عدم قطعیت‌های تقاضا و تولید منابع تجدیدپذیر

فرهاد کوهیان[1] ، دانشجوی کارشناسی ارشد و علی زنگنه[2]، استادیار

۱- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق
farhad.shtc@gmail.com
۲- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق
a.zangeneh@srttu.edu

چکیده: امروزه به دلایل فنی و اقتصادی استفاده از ریزشبکه‌ها به‌طور گسترده‌ای موردتوجه قرارگرفته است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های ریزشبکه‌ها انعطاف‌پذیری آن‌ها است که قادر به عملکرد در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه اصلی می‌باشند. در این مقاله با استفاده از روش تجزیه بندرز یک مدل دوسطحی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه به‌منظور عملکرد یکپارچه آن بین حالت‌های اتصال به شبکه و جزیره‌ای ارائه‌شده است. همچنین در مدل پیشنهادی، با درنظرگرفتن اثر یک ریزشبکه مجاور فرض گردیده که ریزشبکه اصلی فقط در حالت جزیره‌ای قادر به تبادل انرژی با آن هست. مدل ارائه‌شده شامل یک مسئله اصلی برای عملکرد در حالت اتصال به شبکه اصلی و یک زیر مسئله جهت عملکرد در حالت جزیره‌ای است. تابع هدف مسئله اصلی سعی در حداقل نمودن هزینه عملکرد کل ریزشبکه شامل هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی، هزینه ذخیره چرخان، هزینه خرید توان از شبکه بالادست و ریزشبکه مجاور دارد؛ درحالی‌که تابع هدف زیر مسئله به بررسی کافی بودن تولید ریزشبکه و تأمین بدون وقفه بارها در ریزشبکه در حالت جزیره‌ای می‌پردازد. عدم قطعیت‌های مربوط به توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، قیمت انرژی الکتریکی و بار ثابت توسط روش تخمین دونقطه‌ای مدل‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تولید، ریزشبکه، منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز، تجزیه بندرز، تخمین دونقطه‌ای، ذخیره چرخان.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله :۱۳۹۶/۰۶/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر علی زنگنه

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

۱- مقدمه

ریزشبکه، شبکه توزیع کوچکی است که با داشتن اجزایی نظیر منابع تولید پراکنده (تجدیدپذیر و یا تجدید ناپذیر)، منابع ذخیره‌ساز انرژی پراکنده (خازن، چرخ طیار، باتری)، بارهای الکتریکی و حرارتی قادر به فعالیت در دو حالت جزیره‌ای و یا متصل به شبکه سراسری است. تعدد تجهیزات و فن‌آوری‌های قابل‌برنامه‌ریزی و یا غیرقابل‌برنامه‌ریزی در ریزشبکه‌ها، موجب پیچیدگی بهره‌برداری و مدیریت انرژی آن‌ها در مقایسه با شبکه‌های سنتی شده است. در یک ریزشبکه، سیستم مدیریت انرژی مسئول تنظیم بهینه توان واحدهای تولید پراکنده، حالت عملکرد واحدهای ذخیره‌ساز انرژی، تأمین اقتصادی بارهای مصرفی و مدیریت عملکرد حالت گذرای ریزشبکه در شرایط جزیره‌ای و متصل به شبکه هست. به‌طورکلی هدف سیستم مدیریت انرژی، هماهنگی و بهره‌برداری از اجزای مختلف ریزشبکه به‌منظور برق‌رسانی ایمن، قابل‌اطمینان، کیفیت بالا و کمترین آلودگی زیست‌محیطی به اقتصادی‌ترین روش ممکن است.

در مقالات انواع مدل‌های متمرکز و توزیع‌شده برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها، به‌صورت گسترده‌ای بررسی‌شده است. هر دو روش دارای معایب و مزایایی هستند؛ اما به‌طورکلی روش متمرکز دارای ویژگی‌های مطلوب‌تری بوده و ایراد اصلی آن را می‌توان در انعطاف‌پذیری کم به هنگام اضافه نمودن اجزای جدید به مدل و حجم بالای محاسبات دانست [۱]. در این میان، بیشتر مقالات به برنامه‌ریزی ریزشبکه دریکی از دو حالت اتصال به شبکه سراسری یا جزیره‌ای پرداخته و مطالعات کمتری بر روی عملکرد ریزشبکه در هر دو حالت جزیره‌ای و اتصال به شبکه انجام‌شده است. به‌منظور در نظر گرفتن عملکرد ریزشبکه در هر دو حالت بهره‌برداری، در [۲] از ذخیره انرژی اضافی جهت عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای، در [۳] از مدل پاسخگویی بار، در [۴] از تعیین میزان ذخیره‌سازی انرژی موردنیاز برای تضمین عملکرد مطلوب در حالت جزیره‌ای و در [۵] از دستگاه‌های ذخیره‌ساز برای تعادل توان و کاهش تبادل توان با شبکه اصلی در حالت اتصال به شبکه و اطمینان از انتقال موفق به حالت جزیره‌ای استفاده‌شده است. خدایی در [۶] یک مدل دوسطحی با استفاده از روش تجزیه بندرز ارائه نموده است. از نقاط قوت مدل می‌توان، استفاده از تجزیه بندرز به‌منظور کاهش زمان و حجم محاسبات، در نظر گرفتن قابلیت عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای در هر زمان، تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در محدوده زمانی مشخص‌شده توسط آن‌ها و در صورت نیاز حداقل جابه‌جایی بار به‌منظور تضمین عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای، اشاره نمود.

در این مقاله به‌منظور برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه و قابلیت عملکرد یکپارچه آن در هر دو حالت اتصال به شبکه اصلی و جزیره‌ای یک مدل دوسطحی با استفاده از روش تجزیه بندرز و مبتنی بر توسعه مدل [۶] ارائه‌شده است.

مدل ارائه‌شده در [۶] شامل اصلاح برنامه¬ریزی¬های انجام‌شده برای واحدهای تولیدی قابل تنظیم،شارژ و دشارژ سیستم ذخیره¬ساز و بارهای قابل تنظیم است که تا حد ممکن موجب کاهش عدم تطابق در حالت جزیره‌ای و کاهش نیاز به جابه‌جایی بار و قطعی بار و درنتیجه کاهش هزینه عملکرد ریزشبکه می‌شود. به‌منظور توسعه مدل مذکور، موارد زیر در نظر گرفته‌شده‌اند:

۱. عدم قطعیت پارامترهای تصادفی ریزشبکه توسط روش تخمین دونقطه‌ای (TPE).

۲. ذخیره چرخان، جهت آنکه میزان تغییرات تولید واحدها در حالت جزیره‌ای قابل‌اعمال باشد و ریزشبکه قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای را داشته باشد.

۳. محدودیت‌های نرخ شیب افزایشی و کاهشی هر واحد برای زمان تغییر عملکرد ریزشبکه از حالت اتصال به شبکه به حالت جزیره-ای.

۴. محدود نمودن تغییرات برنامه‌ریزی انجام‌شده برای بارهای قابل تنظیم ریزشبکه به‌منظور کاهش نارضایتی برای این مصرف‌کننده‌ها در زمان تغییر عملکرد ریزشبکه از حالت اتصال به شبکه اصلی به حالت جزیره‌ای (محدود نمودن جابه‌جایی بارهای حداکثر به مقدار ۲ ساعت). همچنین در این مقاله، یک ریزشبکه مجاور در نظر گرفته‌شده و فرض شده که ریزشبکه اصلی همواره به آن متصل بوده؛ اما فقط در حالت جزیره‌ای مجاز به تبادل انرژی با آن هست.

سایر قسمت‌های مقاله به‌صورت زیر است:

در بخش دوم روند حل مدل دوسطحی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه ارائه‌شده است. بخش سوم شامل معرفی ساختار و فرمول‌بندی مدل دوسطحی است. الگوریتم تخمین دونقطه‌ای در بخش چهارم توضیح داده‌شده و در بخش پنجم، مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. درنهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری کلی مقاله ارائه گردیده است.

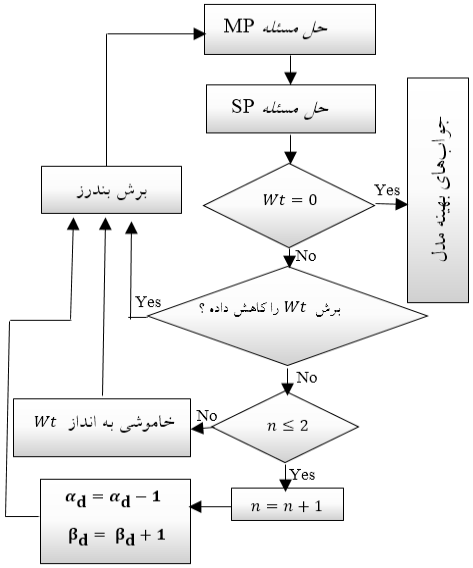
۲- روند حل مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه

شکل (۱) روند حل مدل دوسطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در این روند، ابتدا مسئله MP و سپس مسئله SP حل می‌گردد. با حل مسئله SP چنانچه wt مخالف صفر باشد، برش بندرز به مسئله MP جهت اصلاح برنامه در مدارقرارگرفتن واحدهای تولیدی (UC)، برنامه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز و برنامه‌ریزی انجام‌شده برای بارهای قابل تنظیم اضافه می‌گردد، مسئله MP مجدد حل‌شده و نتایج I_{it}، U_{et}، V_{et} و Z_{ets} برای زیر مسئله فرستاده می‌شود. با حل مسئله SP اگر همچنان wt مخالف صفر بوده روند بالا تکرار می‌گردد. چنانچه با اضافه شدن برش بندرز مقدار wt (عدم تطابق) به ازای چند تکرار دیگر کاهش پیدا نکند، محدوده زمانی تعیین‌شده برای بارهای قابل

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

تنظیم به‌اندازه یک ساعت از هر دو سمت بزرگ‌تر شده و مسئله MP و SP به‌طور مجدد حل می‌شوند. بزرگ نمودن محدوده زمانی بارهای قابل تنظیم نهایت دو بار تکرار می‌شود و اگر همچنان wt مخالف صفر باشد به همان میزان از بار قابل قطع ریزشبکه خاموشی داده می‌شود.



شکل (۱): الگوریتم مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه

۳- ساختار مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه

مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه شامل یک مسئله MP و یک مسئله SP است که در آن انواع محدودیت‌های فنی و اقتصادی دیده‌شده است. محدودیت‌های دیده‌شده در هرکدام از مسائل MP و SP به محدودیت‌های جداشدنی و متصل طبقه‌بندی‌شده‌اند. محدودیت‌های جداشدنی همانند قیود تولید و محدودیت‌های حداقل زمان توقف و حداقل زمان کار که وابسته به واحدهای حرارتی هستند و محدودیت-های متصل نظیر قیود تعادل توان و قیود ذخیره چرخان موردنیاز که توسط تمام واحدهای تولید در سیستم تحت تأثیر واقع می‌شوند. لیست نمادهای به‌کاررفته در فرمول‌بندی مدل به همراه توضیحات مربوط در جدول (۱) در بخش ضمیمه آمده است.

۳-۱- فرمول‌بندی مسئله اصلی (MP)

تابع هدف و قیود مسئله MP در زیر آورده شده است. مسئله MP به بررسی عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه می‌پردازد.

$$Min\left\{\begin{array}{c}\sum_i\sum_t (c_i\,P_{it} + SU_i\,f_{it} + SD_i\,k_{it}) + \\ \sum_t \rho m_t \times pm_t + \\ \sum_d\sum_t Kd \times \Delta_d \times D_{dt} + \sum_t SRmg,t \times C_r\end{array}\right\} \quad (۱)$$

$$P_i^{min}\,I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{max}\,I_{it} \quad (۲)$$

$$P_{it} - P_i(t-1) \leq UR_i \quad (۳)$$

$$Pi(t-1) - Pit \leq DRi \quad (۴)$$

$$Tion \geq UTi\,(Iit - Ii(t-1)) \quad (۵)$$

$$Tioff \geq DTi\,(Ii(t-1) - Iit) \quad (۶)$$

$$Pet \leq Pe^{dch,\,max}\,uet - Pe^{ch,\,min}\,vet \quad (۷)$$

$$Pet \geq Pe^{dch,\,min}\,uet - Pe^{ch,\,max}\,vet \quad (۸)$$

$$C_e min \leq C_{et} \leq C_e max \quad (۹)$$

$$C_e end = C_e start \quad (۱۰)$$

$$T_e^{ch} \geq MC_e\,(u_{et} - u_e(t-1)) \quad (۱۱)$$

$$T_e^{dch} \geq MDe\,(v_{et} - v_e(t-1)) \quad (۱۲)$$

$$u_{et} + v_{et} \leq 1 \quad (۱۳)$$

$$Dd^{min}\,zdt \leq Ddt \leq Dd^{max}\,zdt \quad (۱۴)$$

$$\sum_{t\in[\alpha_d-\beta_d]} D\,dt = E_d \quad (۱۵)$$

$$T_d on \geq MU_d\,(z_{dt} - z_d(t-1)) \quad (۱۶)$$

$$\sum_i P_{it} + \sum_r P_{rt} + \sum_e P_{et} + Pm_t = \sum_d D_{dt} + L_t \quad (۱۷)$$

$$Pm^{min} \leq Pm_t \leq Pm^{max} \quad (۱۸)$$

$$SRit = (Iit\,Pi^{max}) - Pit \quad (۱۹)$$

$$SR_{it} \geq 0 \quad (۲۰)$$

$$SRup_t = Pm^{max} - Pm_t \quad (۲۱)$$

$$SRup_t \leq Pm^{max} \quad (۲۲)$$

$$SRmg_t \leq \sum_i SR_{it} + SRup_t \quad (۲۳)$$

$$SRmg_t \geq \sigma d \times L_t + \sigma_r \times \sum_r P_{rt} \quad (۲۴)$$

رابطه (۱) تابع هدف مسئله MP است که هدف از آن حداقل نمودن هزینه عملکرد ریزشبکه که شامل حداقل نمودن هزینه تولید واحدهای ریزشبکه، هزینه ذخیره چرخان، خرید انرژی از شبکه اصلی و همچنین افزایش درآمد ناشی از فروش انرژی به شبکه اصلی به‌صورت هم‌زمان است. روابط (۲) تا (۶) بیان‌کننده محدودیت‌های لازم جهت برنامه‌ریزی در مدارقرارگرفتن واحدهای تولیدی (UC) ریزشبکه است. محدودیت تولید واحدهای قابل تنظیم ریزشبکه در رابطه (۲) ارائه‌شده و روابط (۳) و (۴) بیانگر محدودیت‌های نرخ شیب تولید و نرخ کاهش تولید است. همچنین محدودیت‌های حداقل زمان کار و توقف است واحدها در (۵) و (۶) بیان‌شده است که روابط دقیق این محدودیت‌ها به‌منظور پیاده‌سازی در [۷] و [۸] آمده است. روابط (۷) تا (۱۳) مربوطه به محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز است. محدودیت حداقل و حداکثر شارژ و دشارژ سیستم ذخیره کننده در (۷) و (۸) ارائه‌شده است. P_{et} بیانگر میزان توان ذخیره‌ساز بوده که علامت منفی برای حالت شارژ و علامت مثبت برای حالت دشارژ استفاده می‌شود. رابطه (۹) محدودیت ظرفیت ذخیره‌ساز را مدل نموده و در (۱۰) تضمین می‌شود که انرژی نهایی ذخیره‌ساز باانرژی اولیه آن برابر باشد. به‌طور مشابه با (۵) و (۶)، محدودیت حداقل زمان شارژ و

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه‌شده است. همچنین رابطه (۱۳) بیانگر این مسئله است که ذخیره‌ساز نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان شارژ و دشارژ شود.

محدودیت‌های مربوط به بارهای قابل تنظیم در روابط (۱۴) تا (۱۶) نمایش داده‌شده است. حداقل و حداکثر انرژی تأمین‌شده بارهای قابل تنظیم در هر بازه زمانی در رابطه (۱۴) ارائه‌شده است. رابطه (۱۵) بیان می‌کند که مقدار انرژی تأمینی برای بارهای قابل تنظیم در محدوده زمانی $\alpha_d - \beta_d$ باید برابر با مقدار انرژی تعیین‌شده Ed باشد. محدودیت حداقل زمان لازم برای تأمین انرژی بارهای قابل تنظیم در (۱۶) ارائه‌شده است. همچنین محدودیت تعادل توان میان تولید و مصرف در ریزشبکه و محدودیت حداقل و حداکثر توان ارسالی یا دریافتی از شبکه اصلی به ترتیب در روابط (۱۷) و (۱۸) نمایش داده‌شده است.

روابط (۱۹) تا (۲۴) محدودیت‌های لازم جهت ذخیره چرخان در ریزشبکه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۹) معرف حداکثر ذخیره‌ای است که هرکدام از واحدهای حرارتی می‌توانند ارائه دهند. این مقدار همواره مثبت بوده که این مسئله در رابطه (۲۰) دیده‌شده است. روابط (۲۱) و (۲۲) بیان‌کننده حداکثر میزان ذخیره‌ای است که می‌توان از شبکه بالادست (شبکه سراسری) تهیه نمود و این مقدار از حداکثر توان قابل دریافت از آن کمتر است. رابطه (۲۳) حداکثر میزان ذخیره چرخان در دسترس و رابطه (۲۴) میزان ذخیره چرخان موردنیاز را نشان می‌دهد [۹].

۳-۲- فرمول‌بندی زیر مسئله (SP)

تابع هدف و قیود مسئله SP در این بخش آورده شده است. مسئله SP به‌منظور عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای در نظر گرفته‌شده است.

$$Min\ wt = \sum_s w_s \qquad (۲۵)$$

$$w_s = \sum_t (SL_{1,ts} + SL_{2,ts}) \qquad (۲۶)$$

$$\sum_i P_{its} + \sum_r P_{rt} + PM_{ts} + Pcm_{ts} + S_{L1,ts} - S_{L2,ts} = \sum_d Ddts + L_t \qquad (۲۷)$$

$$\left|P_{its} - \widehat{Pit}\right| \le UR_i \qquad (۲۸)$$

$$\left|D_{dts} - \widehat{D_{dt}}\right| \le \mathrm{DD} \qquad (۲۹)$$

$$PCm^{min} \times (1 - UMts) \le PCm_t \le PCm^{max} \times (1 - UMts) \qquad (۳۰)$$

تابع هدف مسئله SP در (۲۵) نشان داده‌شده است. این تابع (wt) بیانگر عدم تطابق کلی میان تولید و مصرف در ریزشبکه است. ازآنجایی‌که مدت‌زمان جزیره‌ای شدن و زمان رخ داد آن مشخص نیست برای مدت‌زمان مشخص جزیره‌ای شدن τ (ساعت)، ۲۴ سناریو (s) در نظر گرفته‌شده است. w_s میزان عدم تطابق برای هر سناریو است و $S_{L1,ts}$ و $S_{L2,ts}$ متغیرهای اسلک این مسئله هستند. رابطه (۲۷) محدودیت تعادل توان در حالت جزیره‌ای را نمایش می‌دهد و روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب تضمین می‌نمایند که در زمان شروع حالت جزیره‌ای حداکثر تغییرات توان واحدهای تولیدی ریزشبکه برابر با نرخ شیب یا کاهش تولیدی آن واحد باشد و حداکثر تغییرات توان تأمینی برای بارهای قابل تنظیم نیز برابر با مقدار مشخص DD باشد تا در زمان شروع حالت جزیره‌ای حداقل نارضایتی را برای مصرف‌کنندگان دربرداشته باشد. رابطه (۳۰) محدودیت تبادل توان ریزشبکه با ریزشبکه مجاور در حالت جزیره‌ای را نمایش می‌دهد.

محدودیت‌های ذکرشده در روابط (۲) تا (۱۸) در مسئله SP نیز به‌طور مشابه اعمال می‌گردد. البته باید توجه نمود که کلیه محدودیت‌ها باید در تمام سناریوها برقرار بوده و لذا شاخص s برای تمام این محدودیت‌ها در مسئله SP در نظر گرفته‌شده است. رابطه (۳۱) بیان‌کننده برش بندرز است.

$$\begin{aligned}
&\widehat{w}_{sm} + \sum_i \sum_t \left\{ P_i^{max}\, \overline{\lambda}_{its} (I_{its} - \hat{I}_{it}) - P_i^{min}\, \underline{\lambda}_{its} (I_{itsm} - \hat{I}_{its}) \right\} + \\
&\sum_e \sum_t \left\{ P_e^{ch\,max}\, \overline{\mu}_{ets}^{ch} (U_{ets} - \hat{U}_{et}) - P_e^{ch\,min}\, \underline{\mu}_{ets}^{ch} (U_{ets} - \hat{U}_{ts}) \right\} + \\
&\sum_e \sum_t \left\{ P_e^{dch\,max}\, \overline{\mu}_{ets}^{dch} (V_{ets} - \hat{V}_{et}) - P_e^{dch\,min}\, \underline{\mu}_{ets}^{dch} (V_{ets} - \hat{V}_{ts}) \right\} + \\
&\sum_d \sum_t \{ D_d^{max}\, \overline{\pi}_{dts} (Z_{dts} - \hat{Z}_{dt}) - D_d^{min}\, \underline{\pi}_{dts} (Z_{dts} - \hat{Z}_{dt}) \} \le 0 \qquad (۳۱)
\end{aligned}$$

λ، μ و π متغیرهای دوگان متناظر با برنامه واحدهای تولیدی، شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز و بارهای قابل تنظیم است. $\hat{I}_{its}$ ، $\hat{U}_{ets}$ ، $\hat{V}_{ets}$ و $\hat{Z}_{dts}$ برنامه‌ریزی انجام‌شده برای واحدهای تولیدی، شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز و همچنین بارهای قابل تنظیم است که در مسئله MP به‌دست‌آمده است. اطلاعات بیشتر در مورد نحوه پیاده‌سازی الگوریتم بندرز در [۸] آمده است.

۴- الگوریتم تخمین دونقطه‌ای

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در برنامه‌ریزی ریزشبکه باید در نظر گرفته شود عدم قطعیت ناشی از پارامترهای تصادفی ریزشبکه است. مزیت روش TPE نسبت به روش‌هایی مانند مونت‌کارلو این است که احتیاج به تعداد حل کمتری خصوصاً برای مسائل با تعداد پارمترهای تصادفی زیاد داشته و همچنین نیاز کمتری به شناخت دقیق نسبت به توابع احتمالی متغیرهای غیرقطعی مسئله هست.

الگوریتم تخمین نقطه‌ای به‌صورت دو روش $2m$ و $2m+1$ در مسائل مورداستفاده قرار می‌گیرد. درروش $2m$ تابع F فقط از 2 تمرکز برای هر متغیر تصادفی ورودی استفاده می‌نماید و با m متغیر تصادفی ورودی، مسئله به تعداد $2 \times m$ بار باید حل گردد. درروش $2m+1$ - علاوه بر آنکه مسئله به تعداد $2 \times m$ بار حل می‌شود یک‌بار نیز

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

براساس مقادیر متوسط متغیرهای ورودی تصادفی حل‌شده و لذا به این روش $2m+1$ گفته می‌شود. در این مقاله از روش $2m+1$ استفاده‌شده که الگوریتم و نحوه پیاده‌سازی آن در مرجع [۱۰] آورده شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

ریزشبکه در نظر گرفته‌شده از ۴ واحد قابل‌کنترل، ۲ واحد تجدیدپذیر، یک عدد سیستم ذخیره‌ساز و ۵ بار قابل تنظیم تشکیل‌شده که مشخصات آن‌ها به ترتیب در جدول‌های (۲) تا (۴) ارائه‌شده است [۶]. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب قیمت انرژی الکتریکی شبکه سراسری و میزان بار ثابت ریزشبکه در هر ساعت را نشان می‌دهد. حداکثر توان ارسالی و یا دریافتی از شبکه اصلی و ریزشبکه مجاور به ترتیب در هر ساعت برابر ۱۰MW و ۲MW است. قیمت ذخیره چرخان برابر ۲ $/MWh، ضریب خطای پیش‌بینی بار σ_d برابر ۰/۱ و ضریب خطای پیش‌بینی تولید واحدهای تجدیدپذیر σ_r برابر ۰/۱۳ در نظر گرفته‌شده است.

جدول (۲): مشخصات واحدهای تولیدی

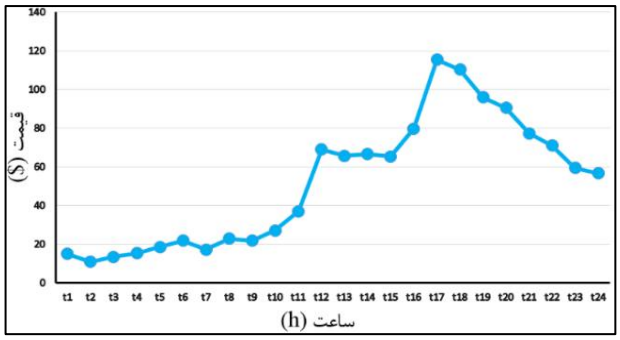
unit	Type	Cost Coefficient ($/MWh)	Min-max Capacity (MW)	Min up/down time (h)	Ramp up/down Rate (MW/h)
واحد۱	قابل کنترل	۲۷/۷	۱-۵	۳	۲/۵
واحد۲	قابل کنترل	۳۹/۱	۱-۵	۳	۲/۵
واحد۳	قابل کنترل	۶۱/۳	۰/۸-۳	۱	۳
واحد۴	قابل کنترل	۶۵/۶	۰/۸-۳	۱	۳
واحد۵	تجدید پذیر	۰	۰-۱	–	–
واحد۶	تجدید پذیر	۰	۰-۱/۵	–	–

جدول (۳): مشخصات سیستم ذخیره‌ساز

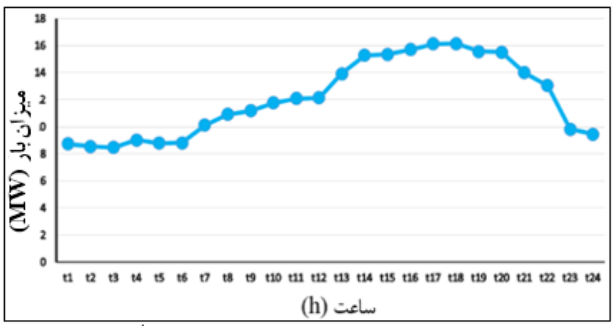
Storage	Capacity (MWh)	Min-Max Charging/Discharging Power (MW)	Min Charging/Discharging Time (h)
باتری	۱۰	۰/۴-۲	۵

جدول (۴): مشخصات بارهای قابل تنظیم

Load	Type	Min-Max Capacity (MW)	Required Energy (MWh)	Start-End Time (h)	Min Up Time (h)
بار۱	قابل انتقال	۰-۰/۴	۱/۶	۱۱-۱۵	۱
بار۲	قابل انتقال	۰-۰/۴	۱/۶	۱۵-۱۹	۱
بار۳	قابل انتقال	۰/۰۲-۰/۸	۲/۴	۱۶-۱۸	۱
بار۴	قابل انتقال	۰/۰۲-۰/۸	۲/۴	۱۴-۲۲	۱
بار۵	قابل قطع	۱/۸-۲	۴۷	۱-۲۴	۲۴



شکل (۲): قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی در هر ساعت



شکل (۳): بار ثابت ریزشبکه در هر ساعت

مدل دوسطحی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MIP) پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS و با استفاده از حل‌کننده CPLEX [۱۲ و ۱۱] پیاده‌سازی شده و الگوریتم تخمین دونقطه‌ای جهت بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل در نرم‌افزار MATLAB اجرا و دو نرم‌افزار باهم لینک شده‌اند.

چهار پارامتر عدم قطعیت درنظرگرفته شده در این مقاله عبارت‌اند از: قیمت انرژی الکتریکی شبکه سراسری، مقدار بار ثابت ریزشبکه و مقدار توان خروجی دو واحد تجدیدپذیر. با توجه به آنچه در بخش چهارم در مورد الگوریتم تخمین دونقطه‌ای گفته شد، مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه به ازای هرکدام از تمرکزهای به‌دست‌آمده برای ۴ پارامتر عدم قطعیت، یک‌بار و به ازای تمام مقادیر پیش‌بینی‌شده (میانگین) آن‌ها نیز یک‌بار حل‌شده که درمجموع مدل برنامه‌ریزی ۹ بار حل می‌گردد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی جهت بهره‌برداری بهینه و یکپارچه ریزشبکه، دو حالت مطالعاتی زیر تعریف و نتایج به‌دست‌آمده تحلیل و بررسی می‌گردند.

حالت مطالعاتی ۱: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه سراسری.

حالت مطالعاتی ۲: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای و معیار T-10 (جزیره‌ای شدن به مدت ۱۰ ساعت) در هر دو حالت با در نظر گرفتن ریزشبکه مجاور و بدون در نظر گرفتن آن.

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

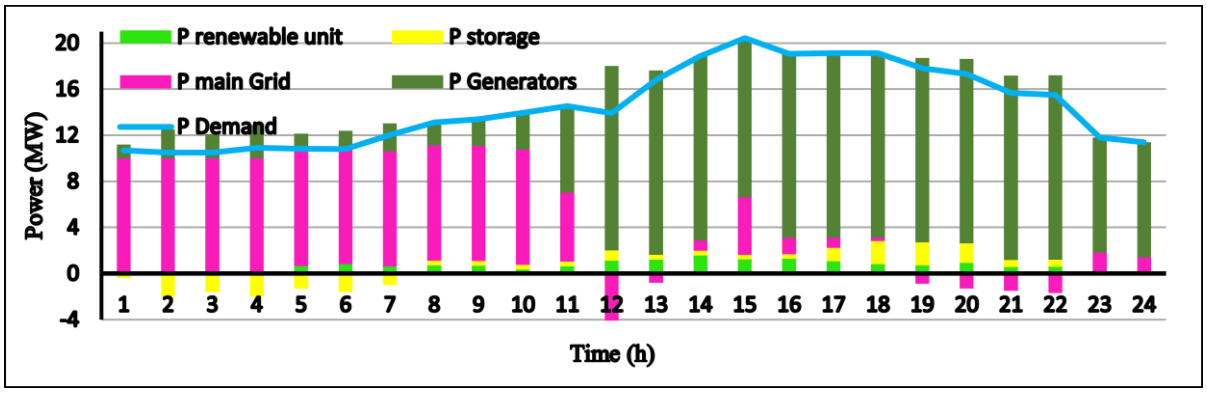
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

جدول (۵): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت واحدهای قابل کنترل در حالت اتصال به شبکه اصلی

واحد تولید	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
واحد ۱	۱/۲	۲/۵	۲/۱	۲/۹	۱/۵	۱/۶	۲/۴	۲	۲/۳	۳/۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
واحد ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
واحد ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۰
واحد ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۰/۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۰

جدول (۶): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه اصلی

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
بار ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰	۰
بار ۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۲	۲	۲	۲



شکل (۴): نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی

۵-۱- حالت مطالعاتی ۱: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه سراسری

در این حالت فرض شده که در طول افق برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت)، ریزشبکه همواره به شبکه اصلی متصل است. مدت‌زمان شبیه‌سازی ۴۱ ثانیه و هزینه عملکرد ریزشبکه برابر $ ۱۱۳۴۳ بوده است. میزان ذخیره چرخان برابر ۳۴/۵ MW و هزینه ناشی از آن برابر $ ۶۹ است. نتایج برنامه‌ریزی انجام‌شده برای واحدهای قابل‌کنترل ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه سراسری در جدول (۵) و برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت بارهای قابل تنظیم در جدول (۶) نشان داده‌شده است، سلول‌های رنگ‌شده در این جدول نشان‌دهنده محدوده زمانی تعیین‌شده توسط هرکدام از مصرف‌کنندگان جهت تأمین انرژی موردنیاز آن‌ها است. نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی در شکل (۴) نشان می‌دهد که تا پیش از ساعت ۱۱ به دلیل پایین بودن قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی نسبت به هزینه تولید توان واحدهای قابل‌کنترل، ریزشبکه حداکثر توان ممکن که مقدار آن ۱۰ MW است را از شبکه کرده است. در ساعات اوج مصرف نیز به دلیل بالا بودن قیمت انرژی شبکه اصلی، واحدها میزان توان بیشتری تولید کرده و خرید انرژی از شبکه اصلی کمتر است و همچنین در این ساعات ذخیره‌ساز دشارژ شد. در ساعات ۱۹ تا ۲۲ به دلیل بالا بودن قیمت انرژی شبکه اصلی نسبت به هزینه تولید واحدها و نیز تضمین تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در این ساعات مازاد تولید توان به شبکه اصلی فرستاده‌شده و به‌عنوان سود در تابع هدف در نظر گرفت شده و باعث کاهش هزینه عملکرد ریزشبکه می‌شود. همان‌طور که در جدول (۶) نیز نشان داده‌شده است بارهای قابل تنظیم در بازه زمانی مشخص‌شده خود برنامه‌ریزی‌شده‌اند ازاین‌رو ضریب جریمه ناشی از انتقال بارهای قابل تنظیم در تابع هدف برابر صفر است.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

۵-۲- حالت مطالعاتی ۲: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای و معیار T-10.

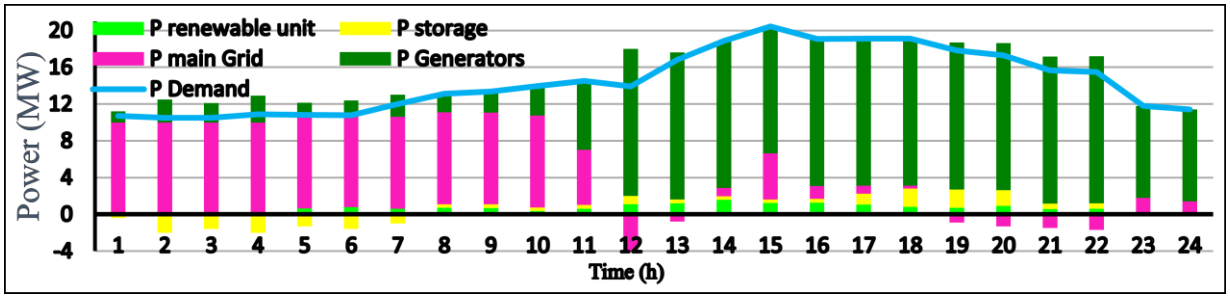
ریزشبکه در پاسخ به اختلالات پیش‌آمده در شبکه اصلی باید قابلیت سوئیچ به حالت جزیره‌ای در هر ساعت و برای هر مدت‌زمان مشخص را داشته باشد و بعد از برطرف شدن این اختلالات، مجدد به شبکه اصلی متصل گردد. برای توصیف قابلیت ریزشبکه برای عملکرد در حالت جزیره‌ای با توجه به متغیر بودن زمان شروع حالت جزیره‌ای، معیار جزیره‌ای T-τ ارائه‌شده است. τ نشان‌دهنده تعداد ساعت متوالی است که ریزشبکه قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای به‌صورت پیوسته را بایستی داشته باشد. به علت عدم قطعیت در زمان شروع حالت جزیره‌ای، برای مدت‌زمان مشخص عملکرد در حالت جزیره‌ای، ۲۴ سناریو به‌منظور

جدول (۷): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت واحدهای قابل‌کنترل در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10

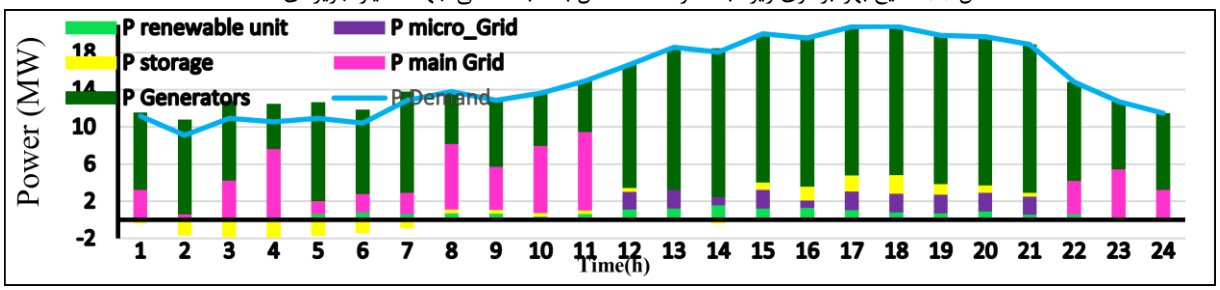
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
واحد ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲/۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
واحد ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲/۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۳/۳	۳/۲	۴/۱
واحد ۳	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۰/۸	۰/۸
واحد ۴	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۳	۳	۳	۱/۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۰

جدول (۸): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10

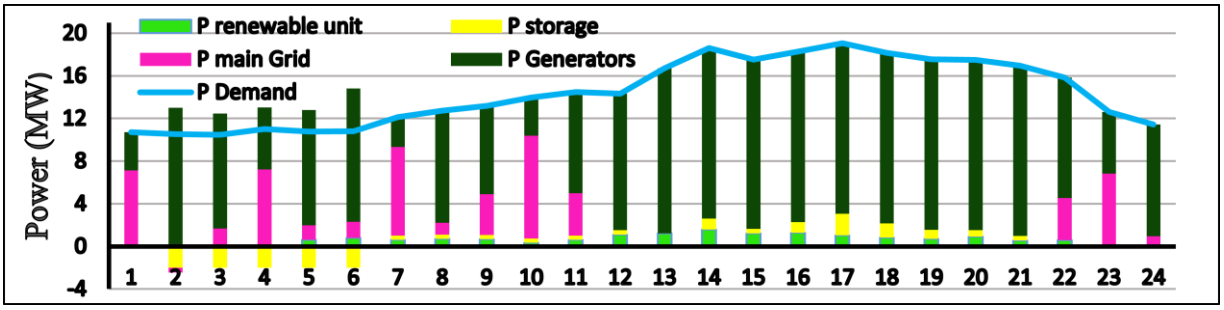
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
بار ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰/۸	۰/۷۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰/۷۶	۰/۰۲	۰
بار ۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۲	۲	۲	۲



شکل (۵): نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10



شکل (۶): نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای T-10 باوجود ریزشبکه مجاور



شکل (۷): نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای T-10 بدون وجود ریزشبکه مجاور

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

در نظر گرفتن کلیه ساعات ممکن شروع زمان جزیره‌ای در مدل مسئله دیده‌شده است. در این بخش به بررسی عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای پرداخته‌شده است و برای این منظور معیار جزیره‌ای *T-10* (حالت جزیره‌ای به مدت ۱۰ ساعت) در نظر گرفته‌شده است.

مدت‌زمان انجام شبیه‌سازی برابر ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه بوده است. میزان هزینه عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10 برابر $ ۱۲۰۸۲ است. نتایج عددی به‌دست‌آمده به‌منظور برنامه‌ریزی واحدهای قابل‌کنترل ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه جهت معیار جزیره‌ای T-10 در جدول (۷) ارائه‌شده است. همان‌طور که از مقایسه باحالت قبل (جدول (۵)) مشاهده می‌شود در حالت جزیره‌ای واحدها توان بیشتری تولید می‌نمایند. برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه سراسری برای معیار جزیره‌ای T-10 در جدول (۸) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۰/۰۲ MW توان موردنیاز بارهای ۳ و ۴ در خارج از محدوده زمانی تعیین‌شده این بارها برنامه‌ریزی‌شده است و ضریب جریمه ناشی از آن در تابع هدف در نظر گرفته‌شده است.

شکل (۵) نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10 را نشان می‌دهد. در ساعات ابتدایی ریزشبکه حداکثر مقدار توان موردنیاز خود را از شبکه سراسری دریافت نموده و سیستم ذخیره‌ساز نیز در این بازه زمانی شارژ می‌شود. در ساعات اوج مصرف، ذخیره‌ساز دشارژ شده، واحدهای تولیدی توان بیشتری را تولید نموده و ریزشبکه مازاد توان تولیدشده خود را به شبکه اصلی ارسال می‌نماید. شکل (۶) نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای T-10 و برای سناریوی شروع حالت جزیره‌ای در ساعت ۱۲ را نشان می‌دهد. در مدت‌زمان جزیره‌ای (۲۱-۱۲) تبادل توان ریزشبکه با شبکه سراسری برابر صفر بوده و از ریزشبکه مجاور نیز توان دریافت می‌نماید.

شکل (۷) برنامه‌ریزی ریزشبکه در حالت جزیره‌ای برای معیار جزیره‌ای T-10 و سناریو ۱۲ بدون در نظر گرفتن ریزشبکه مجاور را نشان می‌دهد در این حالت ریزشبکه به صورت کاملاً مستقل در حالت جزیره‌ای عمل میکند. هزینه عملکرد ریزشبکه در این حالت به $ ۱۳۰۲۱ افزایش‌یافته که ناشی از افزایش تولید واحدهای قابل تنظیم، کاهش فروش انرژی به شبکه اصلی و افزایش جریمه ناشی از جابه‌جایی بارهای قابل تنظیم بوده است، که این امر اهمیت تبادل توان با ریزشبکه مجاور در حالت جزیره‌ای را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل دوسطحی برنامه‌ریزی عملکرد یکپارچه ریزشبکه در هر دو حالت جزیره‌ای و اتصال به شبکه سراسری ارائه‌شده است. مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه با استفاده از روش تجزیه بندرز به یک مسئله اصلی برای عملکرد در حالت اتصال به شبکه اصلی و یک زیر مسئله برای عملکرد در حالت جزیره‌ای تجزیه‌شده است. جهت تضمین عملکرد یکپارچه ریزشبکه از معیار جزیره‌ای τ-T استفاده‌شده است و لذا ریزشبکه هر زمان از شبکه اصلی قطع شود قابلت عملکرد در حالت جزیره‌ای برای مدت زمان مشخص τ ساعت را دارد. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای تصادفی ریزشبکه از روش تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است و همچنین ذخیره چرخان نیز در مدل در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نحوه عملکرد خوب ریزشبکه برای هر دو حالت اتصال به شبکه اصلی و جزیره‌ای (باوجود و عدم وجود ریزشبکه مجاور) را نشان می‌دهد.

ضمایم

جدول (۱): لیست نمادهای مورداستفاده

شاخص‌های مسئله	
شاخص برای بازه‌های زمانی	$\mathbf{t}$
شاخص برای واحدهای قابل تنظیم ریزشبکه	$\boldsymbol{i}$
شاخص برای واحدهای تجدیدپذیر ریزشبکه	$\boldsymbol{r}$
شاخص برای بارهای ریزشبکه	$\boldsymbol{d}$
شاخص برای سیستم‌های ذخیره‌ساز ریزشبکه	$\boldsymbol{e}$
شاخص برای سناریوهای حالت جزیره‌ای	$\boldsymbol{s}$
پارامترهای مسئله	
ضریب هزینه تولید واحد i ام	$\mathbf{c}$ $(\$/MW)$
هزینه روشن شدن واحد i ام	$\boldsymbol{SU_i}$ $(\$)$
هزینه خاموش شدن واحد i ام	$\mathbf{SD}_{\boldsymbol{i}}$ $(\$)$
قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی در زمان t ام	$\boldsymbol{\rho m_t}$ $(\$/MW)$
ضریب جریمه تأمین انرژی بارهای قابل تنظیم	$\boldsymbol{Kd}$ $(\$/h.MW)$
میزان ساعت جابه‌جایی بارهای قابل تنظیم	$\Delta_{\boldsymbol{d}}$ (h)
حداقل توان قابل‌تولید واحد i ام	$\boldsymbol{P_i^{min}}$ (MW)
حداکثر توان قابل‌تولید واحد i ام	$\boldsymbol{P_i^{max}}$ (MW)
حداکثر نرخ افزایش تولید واحد i ام	$\boldsymbol{UR_i}$ (MW)
میزان حداکثر نرخ کاهش تولید واحد i ام	$\boldsymbol{DRi}$ (MW)
حداقل زمان روشن بودن واحد i ام	$\boldsymbol{UTi}$ (h)
حداقل زمان خاموش بودن واحد i ام	$\boldsymbol{DTi}$ (h)
حداقل زمان شارژ شدن ذخیره‌ساز e ام	MC_e (h)
حداقل زمان دشارژ شدن ذخیره‌ساز e ام	MDe (h)
حداقل مقدار توان قابل تأمین برای بار قابل تنظیم d	D_d^{min} (MW)
حداکثر مقدار توان قابل تأمین برای بار قابل تنظیم d	D_d^{max} (MW)
انرژی موردنیاز بار قابل تنظیم d ام	E_d (MWh)
ساعت آغاز محدوده زمان تعیین‌شده بار قابل تنظیم d	α_d (h)
ساعت پایان محدوده زمان تعیین‌شده بار قابل تنظیم	β_d (h)
حداقل مدت‌زمان فعال بودن بار قابل تنظیم d ام	MU_d (h)
حداقل توان قابل‌مبادله با شبکه اصلی در هر ساعت	Pm^{min} (MW)
حداکثر توان قابل‌مبادله با شبکه اصلی در هر ساعت	Pm^{max} (MW)
حداکثر میزان توان قابل‌مبادله با ریزشبکه مجاور	Pcm_t^{max} (MW)

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]

حداقل میزان توان قابل‌مبادله با ریزشبکه مجاور	$Pcm^{min}(MW)$
توان خروجی r مین واحد تجدیدپذیر در زمان t	P_{rt} (MW)
مقدار بار ثابت ریزشبکه برای ساعت t ام	L_t (MW)
متغیر باینری جهت حالت اتصال و قطع ریزشبکه از شبکه اصلی (۱ حالت اتصال، ۰ حالت قطع)	UM_{ts}
متغیرهای مسئله	
متغیر باینری تعهد واحد i ام در زمان t	I_{it}
متغیر باینری زمان روشن شدن واحد i ام در زمان t	f_{it}
متغیر باینری زمان خاموش شدن واحد i ام در زمان t	k_{it}
متغیر باینری حالت شارژ ذخیره‌ساز e ام در زمان t	u_{et}
متغیر باینری حالت دشارژ ذخیره‌ساز e ام در زمان t	v_{et}
متغیر باینری عملکرد بار قابل تنظیم d ام در زمان t	z_{dt}
توان تولیدی واحد i ام واحد در زمان t	P_{it} (MW)
میزان تبادل توان ریزشبکه با شبکه اصلی در زمان t	Pm_t (MW)
میزان تبادل توان ریزشبکه با ریزشبکه مجاور در	Pcm_t (MW)
مقدار توان تأمین‌شده بار d ام در ساعت t ام	D_{dt} (MW)
مدت‌زمان روشن بودن واحد i ام	$Tion$ (h)
مدت‌زمان خاموش بودن واحد i ام	$Tioff$ (h)
توان خروجی ذخیره‌ساز e ام در زمان t	P_{et} (MW)
ظرفیت انرژی موجود در ذخیره‌ساز e ام در ساعت t	C_{et} (MWh)
مدت‌زمان شارژ شدن ذخیره‌ساز e ام	$T_e{}^{ch}$ (h)
مدت‌زمان دشارژ شدن ذخیره‌ساز e ام	$T_e{}^{dch}$ (h)
مدت‌زمان فعال بودن بار قابل تنظیم d ام	T_don (h)
میزان عدم تطابق ریزشبکه	wt (MWh)
میزان عدم تطابق در ریزشبکه به ازای سناریو s ام	w_s (MWh)
متغیر اسلک اول (از جنس تولید)	SL_1 (MW)
متغیر اسلک دوم (از جنس مصرف)	SL_2 (MW)
ذخیره فراهم‌شده توسط واحد i ام در زمان t	SR_{it} (MW)
ذخیره فراهم‌شده توسط شبکه اصلی در زمان t	$SRup_t$ (MW)
ذخیره چرخان موردنیاز ریزشبکه در زمان t	$SRmg_t$ (MW)

مراجع

[1] D. E. Olivares, C. A. Canizares, and M. Kazerani, “A centralized optimal energy management systems for microgrids,” in Proc. Power and Energy Society General Meeting, Jul. 2011.

[2] A. Seon-Ju and M. Seung-Il, “Economic scheduling of distributed generators in a microgrid considering various constraints,” in *Proc. IEEE Power Energy Society General Meeting*, Jul. 2009.

[3] C. Gouveia, J. Moreira, C. L. Moreira, and J. A. P. Lopes, “Coordinatingstorage and demand response for microgrid emergency operation,”*IEEE Trans. Smart Grid*, to be published.

[4] J. Mitra and M. R. Vallem, “Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2360–2367, Nov. 2012.

[5] R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk, and R. Mienski, “Study on operation of energy storage in electrical power microgrid—Modeling and simulation,” in Proc. Int. Conf. Harmonics and Quality of Power *(ICHQP)*, Sep. 2010.

[6] Khodaei, Amin. "Microgrid optimal scheduling with multi-period islanding constraints." *IEEE Transactions on Power Systems* 29, no. 3 (2014): 1383-1392.

[7] Pandžić, Hrvoje, Ting Qiu, and Daniel S. Kirschen. "Comparison of state-of-the-art transmission constrained unit commitment formulations." In *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5. IEEE, 2013.

[8] Shahidehpour, M., and Y. Fu. "Tutorial: benders decomposition in restructure power systems." (2005).

[9] Alabedin, A. Z. “Generation Scheduling in Microgrids under Uncertainties in Power Generation”. M.A.S. Thesis, University of Waterloo, 2012.

[10] Morales, Juan M., and Juan Perez-Ruiz. "Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow." *IEEE Transactions on Power Systems* 22, no. 4 (2007): 1594-1601.

[11] GAMS Webpage: http://www.gams.com/.

[12] GAMS Webpage: http://www.cplex.com/

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.9.6]