برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه‌های قابل بازآرایی در شرایط عادی و اضطراری

محمد همتی[۱]، دانشجوی دکتری؛ سعید قاسم‌زاده[۲]، استادیار؛ بهنام محمدی ایواتلو[۳]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران– m.hemmati@tabrizu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران– gzadeh@tabrizu.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران– bmohammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده: با توجه به اینکه در ساختار ریزشبکه‌ها انواع منابع انرژی با ماهیت احتمالاتی وجود دارد، نیاز به روش‌های کنترلی و برنامه‌ریزی مناسب جهت بهره‌برداری ضروری می‌باشد. استراتژی بازآرایی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل عملی مناسب جهت بهبود عملکرد ریزشبکه به‌کار گرفته‌شود. افزودن قابلیت بازآرایی به ریزشبکه‌ها منجر به پیدایش نسل جدیدی از ریزشبکه‌ها تحت عنوان RMG شده‌است. از این‌رو در این مقاله، برنامه‌ریزی RMG تحت فرآیند بازآرایی، در دو حالت عادی و اضطراری مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض بر این است که ریزشبکه‌های موجود خود از چندین ریزشبکه کوچک‌تر تشکیل شده‌اند. از این‌رو علاوه بر برنامه‌ریزی ریزشبکه در شرایط عادی، مسئله‌ی مدیریت و عملکرد ریزشبکه‌های همسایه در شرایط اضطراری مورد بحث قرار خواهد گرفت. برای این منظور دو ریزشبکه نمونه ۱۰ و ۳۳ باسه که در حالت عادی متصل به شبکه است درنظر گرفته‌می‌شود. در حالت عادی هدف از برنامه‌ریزی پیشنهادی، یافتن بهینه‌ترین ساختار ممکن شبکه است به‌گونه‌ای که کمترین هزینه به شبکه تحمیل گردد. در شرایط اضطراری، ریزشبکه مذکور به چندین ریزشبکه همسایه تبدیل خواهد شد. در این حالت برنامه‌ریزی پیشنهادی با یافتن بهینه‌ترین ساختار ممکن جهت اتصال ریزشبکه‌های همسایه، میزان حذف بار تا زمان بازگشت به شرایط عادی را به حداقل می‌رساند. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی بهبود وضعیت سیستم از نظر هزینه و میزان حذف بار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، بازآرایی، کلیدهای قابل کنترل از راه دور، حذف بار، هزینه.

Optimal Scheduling of Reconfigurable Micro-grid in Normal and Emergency Conditions

Mohammad Hemmati[1], Phd student; Saied Ghasemzadeh[2], Assistant professor; Behnam Mohammadi-ivatloo[3], Associate professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: m.hemmati@tabrizu.ac.ir
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: g_zadeh@tabrizu.ac.ir
3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmohammadi@tabrizu.ac.ir

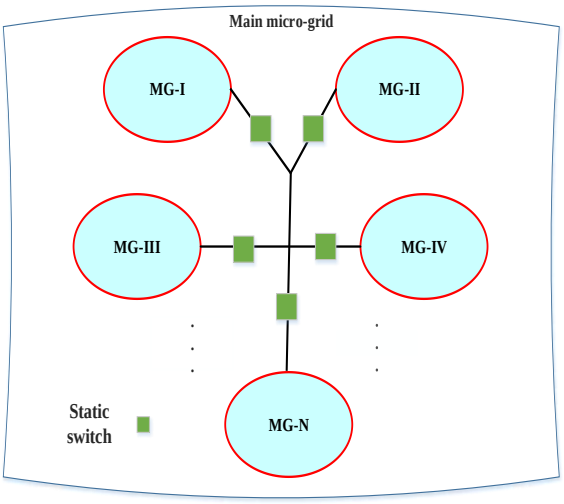
Abstract: Dou to penetration of stochastic resources in the microgrids, the need for new control and scheduling method is essential. Reconfiguration strategy can be considered as a practical solution for network performance improvement. Therefore, in this paper the scheduling of reconfigurable microgrid (RMG) in the normal and emergency conditions are analyzed. It is assumed that microgrid consists of several small neighboring microgrids, so in addition to the microgrid scheduling in the normal condition, the problem of neighboring microgrid management will be solved in the emergency condition. In the first condition, microgrid total cost minimization is considered as an objective while in the emergency condition, the microgrid divided to several neighboring microgrids and the proposed method tries to find the optimal structure for neighboring connection and minimizes the total load shedding, until the return to the normal condition. The results show the effectiveness of proposed method from the cost and load shedding minimization point of view.

Keywords: Microgrid, reconfiguration, remotely controllable switch, load shedding, cost.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴
نام نویسنده مسئول: سعید قاسم‌زاده
نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۱- مقدمه

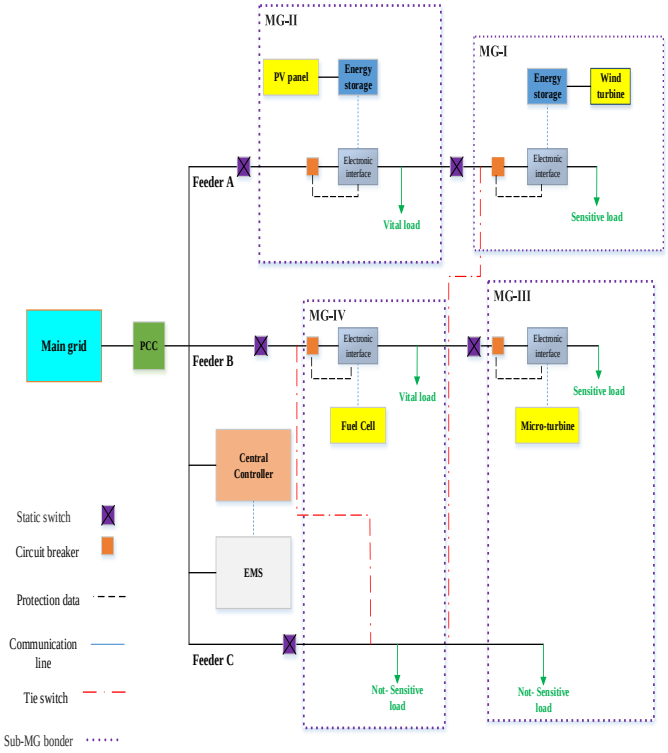
ریزشبکه‌ها مجموعه اجزایی شامل انواع مولدهای پراکنده توزیع‌شده (DER[1])، تجهیزات تبدیل توان، سیستم‌های ارتباطی و سیستم مدیریت انرژی (EMS[2]) است که تحت نظارت یک کنترل‌کننده مرکزی به مشترکین سرویس‌دهی می‌کند. با ظهور شبکه‌های هوشمند و تکنولوژی‌های جدید مخابراتی و کامپیوتری، دسترسی به بسترهای نظارتی و کنترلی امکان‌پذیرتر شده‌است. به‌کارگیری این تجهیزات در ریزشبکه‌ها نیز موجب تسهیل فرآیند کنترل می‌گردد. یکی از تجهیزات به‌کارگرفته شده در ساختار ریز شبکه‌ها وجود کلیدهای قابل کنترل از راه دور و قابل برنامه‌ریزی است که موجب تسهیل و بهبود فرآیند بازآرایی در ریز شبکه‌ها نسبت به شبکه‌های مرسوم شده است. تجدید آرایش در ریزشبکه‌ها برخلاف شبکه‌های مرسوم می‌تواند در سطوح مختلفی انجام گیرد. قابلیت جزیره‌ای‌شدن و جداسازی از شبکه بالادست در صورت رخ‌دادن خطا که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد، می‌تواند توسط فرآیند بازآرایی کنترل شود. از سوی دیگر، در شبکه‌های جدید ریز شبکه‌های مختلفی می‌توانند وجود داشته باشند. این ریزشبکه‌ها که در همسایگی همدیگر نیز قرار دارند، ممکن است جهت تأمین بارهای خود از یک یا چند ریز شبکه همسایه توان بگیرند. نمونه‌ای از چند ریزشبکه مجاور هم در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: ساختار چندین ریزشبکه همسایه با قابلیت تبادل توان به کمک کلیدهای قابل کنترل

کنترل تبادل توان و اتصال مابین ریزشبکه‌های همسایه، توسط باز و بسته‌کردن کلیدهای استاتیکی (SS[3]) که مابین ریزشبکه‌های مختلف قرار دارند، تحت فرآیند بازآرایی انجام می‌گیرد. این تبادل توان تحت فرآیند بازآرایی، با کمک به افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده که بیشتر مبتنی بر انرژی های تجدید پذیر هستند و در نزدیکی بارها قرار می‌گیرند؛ علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای سنتی، از احداث پست یا خط انتقال جدید برای تأمین بارها جلوگیری می‌کند. اهمیت اتصال ریزشبکه‌ها به ریزشبکه‌های مجاور در شرایط بروز خطا و زمانی که تعدادی از واحدها و یا اتصال با شبکه بالادست از دست می‌رود، بروز بیشتری پیدا خواهد کرد.

بازآرایی فرآیند تغییر توپولوژی شبکه به کمک کلیدهای قابل کنترل از راه دور (RCS[4])هایی است که در حالت عادی باز یا بسته هستند. با تغییر وضعیت کلیدها، بازآرایی می‌تواند مسیر تغذیه‌ی بارها و ساختار شبکه را تغییر دهد. یک بازآرایی به‌موقع می‌تواند در شرایط اضطراری بخش‌های سالم را نیز ایزوله کند، که این امر موجب بازیابی شبکه در کمترین زمان ممکن می‌گردد. علاوه براین بازآرایی با تقسیم مساوی بار بر روی فیدرها، به میزان نفوذ DERها و ذخیره‌سازهای انرژی کمک می‌کند. افزودن قابلیت بازآرایی به ریزشبکه‌ها منجر به پیدایش نسل جدیدی از ریز شبکه‌ها تحت عنوان RMG[5] شده است. RMGها ریزشبکه‌های قابل بازآرایی هستند که مجهز به کلیدهای قابل کنترل از راه دور می‌باشند. کلیدهایی که اجازه تغییر ساختار ریزشبکه را بر اساس شرایط، نیازمندی‌ها و منافع مختلف برعهده دارند. شکل ۲ نمونه‌ای از یک RMG را نشان می‌دهد که علاوه بر بارها، تجهیزات کنترلی و حفاظتی، سیستم مدیریت انرژی و کنترل‌کننده مرکزی، دارای یک درجه آزادی بیشتر یعنی همان (RCS) می‌باشد وجود کلیدهای قابل کنترل این امکان را فراهم می‌کند که ریزشبکه بتواند در شرایط اضطراری به ریزشبکه‌های کوچک‌تر تبدیل شود.



شکل ۲: نمونه‌ای از یک RMG متشکل شده با قابلیت تبدیل به چندین ریزشبکه همسایه

انواع طرح کنترلی برای ریزشبکه‌ها در [۱] ارائه شده‌است. این طرح شامل سیستم مدیریت انرژی (EMS)، کنترل‌کننده‌ی مرکزی ریزشبکه (MGCC 6)، کنترل‌کننده‌ی بار و کنترل کننده‌ی میکرومنابع است. MGCC با تبادل و ارتباط مابین کنترل‌کننده‌های بار و میکرومنابع، اطلاعات مورد نیاز همانند ولتاژ، فرکانس و توان‌های اکتیو و راکتیو را دریافت می‌کند. سپس براساس برنامه‌های EMS، دستورات لازم را به

آن‌ها صادر می‌کند. کنترلرهای بار و میکرومنابع نیز با دریافت دستورات، بارها و منابع موجود در سطح ریزشبکه را کنترل می‌کنند. انواع سیستم‌های مدیریت انرژی موجود برای ریزشبکه‌ها در [۲، ۳] مورد بررسی قرار گرفته‌است. دو روش مرسوم برای کنترل ریزشبکه، مدل‌های متمرکز و غیرمتمرکز هستند. مدل‌های متمرکز کلیه اطلاعات لازم جهت برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه را جمع‌آوری می‌کند. اما در روش‌های غیرمتمرکز هر کدام از اجزا به عنوان یک agent درنظر گرفته‌می‌شوند که توانایی عملکرد و تصمیم‌گیری مستقل را دارند. البته برنامه‌ریزی و کنترل نهایی ریزشبکه از انتقال اطلاعات تک تک agentها به یک مرکز کنترل به‌دست خواهد آمد [۴]. با توجه به اینکه ریزشبکه‌ها معمولاً در تأمین بار دارای محدودیت هستند، جهت بهره‌برداری هرچه بیشتر، ریزشبکه‌ها در کنار هم و در تبادل با هم تحت عنوان Multi-microgrid مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۵-۷].

در شبکه‌های چند ریزشبکه‌ای[۷] علاوه‌بر این‌که هر ریزشبکه توسط کنترلر های محلی خود مدیریت می‌شود، نحوه تبادل و اتصال ریزشبکه‌ها با هم نیز توسط کنترلر اصلی شبکه مدیریت و کنترل می‌گردد. [۷] نیز بهترین راه جهت مدیریت هرچه بهتر شبکه‌های توزیع را تجزیه آن به ریزشبکه‌های کوچک در قالب چندریزشبکه‌ای می‌داند؛ که در این حالت کنترل شبکه به‌ویژه کنترل میکرومنابع به کار گرفته‌شده به خوبی انجام می‌گیرد. [۸] بیان می‌کند که به دلیل متناوب بودن منابعی نظیر بادی و خورشیدی در سطح ریزشبکه‌ها و همچنین وجود عدم قطعیت در میزان بار، ممکن است ریزشبکه با کمبود توان و یا اضافه بار مواجه شود. این مقاله راه حل این مسئله را اتصال ریزشبکه‌ها و همسایگی آن‌ها می‌داند. از این‌رو یک چارچوب جدید برای بهره‌گیری و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها تحت عنوان ریزشبکه‌های همسایه معرفی می‌کند. در [۹]، یک نمونه ریزشبکه با قابلیت بازآرایی، شامل حامل‌های انرژی مختلف، ادوات ذخیره‌ساز و DG های متنوع درنظرگرفته شده‌است. با تغییر ساختار فیدرها و باس‌های مختلف، پیکربندی ریزشبکه جهت یکپارچه‌سازی و ادغام DER ها بسیار انعطاف پذیر می‌گردد. در [۱۰]، عملکرد مطلوب ریزشبکه تحت فرآیند بازآرایی در هنگام رخ دادن خطا مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۱].

در [۱۲] بازآرایی ریزشبکه در دو حالت اتصال به شبکه و حالت جزیره‌ای جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه بررسی شده‌است. ارزیابی آسیب‌پذیری می‌تواند راهی برای افزایش امنیت و پایداری باشد. در [۱۳]، یک برنامه‌ریزی بهینه برای ریزشبکه‌ها قابل بازآرایی در حضور عدم قطعیت‌های مختلف بررسی شده‌است. در این مقاله سود مالک ریزشبکه در حضور مولدهای بادی از دیدگاه ریسک مورد ارزیابی قرار گرفته و ساختار بهینه شبکه بر اساس آن معین شده‌است.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته بر روی کارهای پیشین، می‌توان متوجه اهمیت و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها در هر دو وضعیت عادی (متصل به شبکه) و شرایط جزیره‌ای گردید. از این‌رو در این مقاله به کمک فرآیند بازآرایی به عنوان یک راه حل ارزان قیمت، کنترل ریزشبکه در هر دو حالت نرمال و اضطراری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قسمت‌های اصلی این مقاله به این ترتیب است که: در قسمت دوم مسئله‌ی برنامه‌ریزی ریزشبکه در هر دو حالت (عادی و اضطراری) بیان شده و فرمولاسیون مربوطه ارائه‌می‌گردد. در قسمت سوم الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت ساختار شبکه جهت رسیدن به اهداف مختلف در هر دو حالت کاری ارائه خواهدشد. در قسمت چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه پیاده شده و نتایج به‌دست‌آمده با کارهای مشابه مقایسه می‌گردد. در نهایت در قسمت پنجم نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- بیان مسئله

همان‌طورکه در قسمت قبلی بیان شد، بازآرایی ریزشبکه‌ها بسته به شرایط کاری می‌تواند برای اهداف مختلفی انجام گیرد. با توجه به اینکه قطع و وصل کردن تعدادی از RCSهای به کاررفته در ساختار ریزشبکه در برخی از ساعات بر روی هزینه‌های تولیدی واحدهای قابل پخش تأثیر گذار است، و همچنین مدیریت توپولوژی ریزشبکه می‌تواند نیاز به خرید برق از شبکه بالادست را کاهش دهد، حداقل‌کردن هزینه‌های ناشی از تولید و خرید برق از شبکه بالادست به عنوان هدف فرآیند بازآرایی در شرایط عادی درنظرگرفته‌می‌شود. در صورت رخ‌دادن خطا و عملکرد جزیره‌ای، تأمین بارها در اولویت قرار می‌گیرد و بازآرایی با تغییر وضعیت کلیدها سعی در به حداقل رساندن حذف بار خواهد داشت، از این‌رو تأمین اکثریت بارها در این شرایط به عنوان هدف فرآیند بازآرایی در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو مسئله برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های قابل بازآرایی به دو مسئله:۱- برنامه ریزی در شرایط عادی ۲- برنامه‌ریزی در شرایط اضطراری و تبدیل ریزشبکه به چندین ریزشبکه همسایه تبدیل می‌گردد. برای هر کدام فرمولاسیون شامل تابع هدف و قیود مربوطه در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- برنامه‌ریزی RMG در شرایط کار عادی و اتصال به شبکه

همان‌گونه که بیان شد در حالت کار عادی RMG، بازآرایی با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه خرید برق از شبکه‌ی بالادست صورت می‌گیرد. RMG در این شرایط می‌تواند از طریق کلید PCC[8] با شبکه‌ی بالادست تبادل توان داشته باشد. از سوی دیگر در سطح RMG در کنار میکرومنابعی چون توربین بادی و ذخیره‌ساز انرژی، میکروتوربین‌هایی وجود دارد که هزینه بهره‌برداری این میکروتوربین‌ها قسمت اصلی هزینه‌های RMG را تشکیل می‌دهد. RMGCC[9] می‌تواند به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌های خود (هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه خرید برق از شبکه بالادست) میزان شارژ و دشارژ باتری، نحوه باز و بسته‌کردن کلیدها و وضعیت کاری میکروتوربین‌ها را در هر ساعت تغییر دهد. علاوه بر این تغییر توپولوژی RMG تحت فرآیند بازآرایی، امکان فروش برق به شبکه بالادست را در ساعاتی که توان تولیدی در

RMG نسبت به مصرف بیشتر است را بالا برده و می‌تواند نقش موثری در کاهش هزینه‌ها داشته باشد.

اگر Y^{sw} نشان دهنده‌ی ساختار RMG در هر لحظه باشد، تابع هدف در این وضعیت کاری به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$\text{Min } f_1(Y^{sw}) = \sum_t \sum_i \left[c_i + b_i P_i(t) + a_i P_i^2(t) + SU_i + SD_i \right] + \sum_t \lambda(t) P_t^b \quad (۱)$$

جمله‌ی اول تابع هدف بالا مربوط به هزینه‌های بهره‌برداری میکروتوربین‌ها و هزینه‌ی روشن‌شدن و خاموش‌شدن آن‌ها است. جمله دوم مربوط به هزینه‌ی خرید برق از شبکه‌ی بالادست است. P_t^b توان مبادله شده مابین RMG و شبکه‌ی بالادست است. در حالتی که RMG به شبکه‌ی بالادست برق بفروشد، P_t^b منفی در نظر گرفته می‌شود تا این جمله به صورت سود در تابع هدف ظاهر شود و از هزینه‌های شبکه کاسته شود. $\lambda(t)$ قیمت مبادله برق در لحظه t است.

محدودیت‌های تابع هدف (۱) به صورت زیر هستند:

$$\sum_i P_i(t) + P_{wind}(t) \pm P_{bat}(t) \pm P_{buy}(t) = P_{loss}(t) + \sum_l P_{Load_l}(t) \qquad \forall\, t=1,\dots,24 \quad (۲)$$

$$P_i^{\min}(t) \le P_i(t) \le P_i^{\max}(t) \quad (۳)$$

$$P_i(t) - P_i(t-1) \le RU_i \quad (۴)$$

$$P_i(t-1) - P_i(t) \le RD_i \quad (۵)$$

$$MUT_i \ (u_i(t) - u_i(t-1)) \le T_i^{on} \quad (۶)$$

$$MDT_i \ (u_i(t-1) - u_i(t)) \le T_i^{off} \quad (۷)$$

$$V_k^{\min} \le V_k \le V_k^{\max} \quad (۸)$$

$$|I_j| \le I_j^{\max} \quad (۹)$$

$$SOC^{\min} \le SOC(t) \le SOC^{\max} \quad (۱۰)$$

$$P_{\text{dis.bat}}^{\min} \ x_{Bd} \le P_{bat} \le P_{\text{dis.bat}}^{\max} \ x_{Bd} \quad (۱۱)$$

$$P_{\text{char.bat}}^{\min} \ x_{Bc} \le -P_{bat} \le P_{\text{char.bat}}^{\max} \ x_{Bc} \quad (۱۲)$$

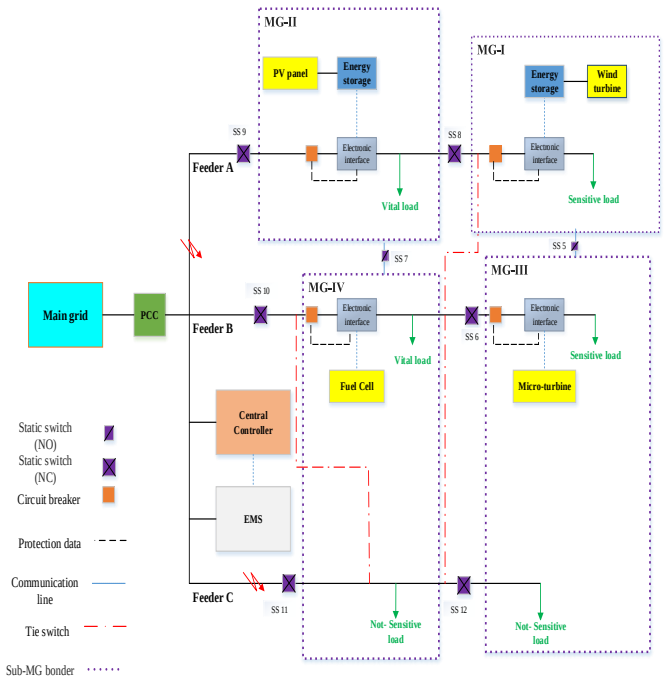
$$x_{Bd} + x_{Bc} = 1 \quad (۱۳)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \left| Y_t^{sw} - Y_{t-1}^{sw} \right| \le Y_{\max}^{sw} \quad (۱۴)$$

قید (۲) نشان دهنده‌ی قید تعادل توان در شبکه است، به این ترتیب که مجموع توان تولیدی میکروتوربین‌ها، توربین بادی، توان مبادله شده با شبکه بالادست و میزان توان شارژ و یا دشارژ باتری باید با مجموع بارهای مصرفی و میزان تلفات در هر ساعت برابر باشد. قید (۳) بیان‌گر محدودیت توان اکتیو تولیدی میکروتوربین‌ها است که نباید از مقدار حداقل و حداکثر تجاوز کند. با توجه به وضعیت مختلف میکروتوربین‌ها در یک بازه‌ی زمانی، میزان توان تولیدی آن‌ها در یک ساعت بعد و شیب نرخ افزایش و کاهش توان با در نظرگرفتن رمپ میکروتوربین، به صورت محدودیت در (۴) و (۵) بیان شده‌اند [۱۴]. حداقل زمان روشن ماندن و خاموش ماندن میکروتوربین‌ها در (۶) و (۷) آمده است. ولتاژ هر باس RMG بایستی در محدوده‌ی مجاز قرار داشته باشد (قید (۸)) و جریان هر شاخه RMG باید از یک میزان مشخص کمتر باشد (قید (۹)). حالت شارژ باتری، محدودیت میزان توان شارژ و دشارژ باتری و حالت کاری شارژ و دشارژ آن در قیود (۱۰)- (۱۱) بیان شده است. قید (۱۲) محدودیت حداکثر تغییرات در توپولوژی RMG را نشان می‌دهد. به این ترتیب که تعداد توپولوژی‌های به دست آمده برای RMG در طول روز نباید از تعداد مشخصی بیشتر باشد [۱۳]. علاوه بر قیود بالا، قید شعاعی بودن RMG بایستی در هر ساعت برقرار باشد [۱۵].

۲-۲- برنامه‌ریزی RMG در شرایط اضطراری

همان‌گونه که بیان شد، برنامه‌ریزی ریزشبکه در شرایط اضطراری و زمانیکه خطایی در شبکه بالادست رخ داده است، بسیار ضروری می‌باشد. در این حالت اولین کارکرد حفاظتی، قطع کلید اتصال مشترک ریزشبکه به شبکه بالادست است. به این ترتیب ریزشبکه به حالت جزیره‌ای تغییر وضعیت داده و عملاً هیچ تبادل توانی بین آن و شبکه بالادست صورت نمی‌گیرد. امکان از دست‌دادن بار و قطعی آن‌ها بیشتر در این حالت شبکه بالادست است. با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های اساسی ریزشبکه‌ها حضور منابع محلی در نزدیکی بارها است، اگر بتوان بستری را فراهم نمود که این منابع تا زمان رفع خطا تنها به تعداد خاصی از بارها توان تحویل دهند، می‌توان تا حد زیادی میزان حذف بار را کاهش داد. یک راه‌حل مناسب برای این هدف تبدیل RMG به چندین ناحیه‌ی کوچک‌تر است؛ به‌گونه‌ای که این نواحی تا زمان رفع خطا، بتوانند تحت فرآیند بازآرایی در هم سایگی هم عمل کنند. شکل ۳ همان RMG نشان داده شده در شکل ۲ است که در شرایط اضطراری قرار دارد.



شکل ۳: ساختار RMG که در سطح آن خطا رخ داده است

وقتی که RMGCC سیگنال رخ دادن این خطاها را دریافت می‌کند دو کار اساسی انجام می‌دهد:

۱- قطع کلید PCC و جدا کردن RMG از شبکه بالادست، ۲- قطع کلیدهای استاتیکی 6، 8، 12-9

به این ترتیب RMG به ۴ ریزشبکه‌ی کوچک که در همسایگی هم قرار دارند، تبدیل می شود. هر ریز شبکه شامل بارها و منابع مختلفی است. برای تأمین بارها این ریزشبکه‌ها می‌توانند به تبادل توان بپردازند. این کار از طریق فراهم کردن یک بستر مناسب به کمک فرآیند بازآرایی میسر می‌شود. برای تبادل هرچه بهتر توان مابین این مناطق، دو سطح ارتباطی درنظرگرفته‌شده‌است. در سطح اول هر ناحیه می‌تواند از طریق کلیدهایی با مناطق مجاور خود در ارتباط باشد. در سطح دوم یک ناحیه مشترک برای همه ریزشبکه‌ها در نظر گرفته می‌شود که توان مبادله شده از طریق این سطح مشترک انجام می‌گیرد (این زیرساخت در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از سطح مشترک توان یک جمع‌کننده است. این مفهوم که بیشتر در مباحث مخابراتی و به عنوان یک تکنیک مناسب در شبکه‌های بی سیم استفاده می شود [۱۶]، می‌تواند یک رویکرد جدید در ریزشبکه های آتی مبتنی بر زیرساخت‌های شبکه‌های هوشمند باشد.

نحوه‌ی اتصال ریزشبکه‌های همسایه به ناحیه مشترک تبادل توان، می‌تواند ساختارهای گوناگونی به‌وجود آورد. اگر در N ریزشبکه‌ی همسایه، N' ناحیه با مشکل کمبود توان مواجه شوند، کل حالت‌های ممکن برای اتصال و تبادل توان بین نواحی از طریق رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید:

$$2^{N-N'}-1 \quad \text{=تعداد حالت‌های ممکن برای اتصال ناحیه } i \text{ با سایر نواحی} \qquad (۱۵)$$

با توجه به رابطه (۱۵)، به‌طور مثال اگر در شکل ۳، MG-I با مشکل کمبود توان مواجه شود، ۷ حالت برای اتصال نواحی همسایه از طریق سطح مشترک جهت تبادل توان میسر خواهد بود.

با توجه به اینکه در این ریزشبکه‌ها، بارها و منابع مختلفی وجود دارد، ممکن است بعضی از نواحی با کمبود ظرفیت توان جهت تأمین بار مواجه شوند. از این‌رو جهت مدیریت بار در سطح ریزشبکه‌های همسایه، فرآیند بازآرایی برای کنترل تبادل توان و اتصال مابین ریزشبکه‌ها به‌کار گرفته می‌شود.

تابع هدف و قیدهای مسئله در این حالت به صورت زیر هستند:

$$\text{Min } f_3(Y^{sw}) = \sum_n \sum_t P_{shed_n}(t) \qquad (۱۶)$$

(۱۷)

$$\sum_i P_{i,n}(t) + P_{wind}(t) \pm P_{bat}(t) = P_{loss_n}(t) + \sum_l P_{Load_{l,n}}(t) - P_{shed_n}(t) \qquad \forall\, t=1,\ldots,t \quad \forall\, n=1,\ldots,N$$

قیود (۳) تا (۱۳) مانند حالت قبلی باید برقرار باشند. با توجه به تقسیم شدن RMG به چندین ناحیه، نیازی به برقرای محدودیت‌های ساختار شعاعی و حداکثر تعداد توپولوژی نخواهد بود.

الگوریتم کلی برای کنترل فرآیند بازآرایی بر روی کلیدهای استاتیکی، جهت حداقل کردن حذف بار در ادامه آمده است:

کنترلرهای محلی به صورت ساعتی میزان توان و تقاضای موجود در هر ریزشبکه را در اختیار RMGCC قرار می‌دهند تا اختلاف این دو به صورت زیر محاسبه شود (اختلاف این دو تحت عنوان UPC[10] نامیده می‌شود):

$$\text{UPC}_i = \sum P_{gen-MG_i} - \sum P_{load-MG_i} \qquad i = 1,..2,N \qquad (۱۸)$$

بررسی رابطه‌ی زیر برای همه‌ی نواحی :

$$\text{UPC}_i \geq \alpha_2 \sum P^{\max}_{gen-MG_i} \qquad i = 1,2,\ldots N \qquad (۱۹)$$

اگر رابطه‌ی بالا برای همه‌ی ریزشبکه‌ها برقرار باشد (α_2 یک عدد مابین ۰ و ۱ است برای درنظرگرفتن تلفات)، نیازی به انجام فرآیند بازآرایی و اتصال ریزشبکه‌ها با هم نیست و تا زمان رفع عیب می‌توانند به صورت ایزوله به کار خود ادامه دهند. اما اگر رابطه‌ی (۱۹) برای هیچ‌کدام از ریزشبکه‌ها برقرار نباشد، RMGCC زیرمسئله‌ی حذف بار (در ادامه بیان می شود) را فعال می‌کند؛ حدف بار تا زمانی ادامه می‌یابد که رابطه (۱۹) برای همه‌ی نواحی برقرار شود.

اگر رابطه‌ی (۱۹) برای یک یا چند عدد از ریزشبکه‌ها برقرار نباشد، RMGCC مجموع کل توان مازاد شبکه را طبق رابطه‌ی زیر بررسی می‌کند:

$$\sum_{i=1}^{N} UPC_i \geq \alpha \sum_{i=1}^{N} \sum P^{\max}_{gen-MG_i} \qquad (۲۰)$$

اگر رابطه (۲۰) برقرار نباشد یعنی در کل شبکه با کمبود توان مواجه هستیم و زیرمسئله‌ی حذف بار فعال می‌شود. اما اگر رابطه‌ی (۲۰) برقرار باشد، RMGCC بهینه‌ترین وضعیت برای کلیدهای اطراف ریزشبکه‌های مورد نظر (ریزشبکه‌هایی که رابطه (۱۹) در آن‌ها برقرار نیست) پیدا می‌کند تا با اتصال ریزشبکه با ریزشبکه(ها)ی مجاور، تبادل توان صورت گیرد و رابطه‌ی (۱۹) برای همه‌ی ریزشبکه‌ها برقرار شود. در صورتی که بازآرایی در سطح کلیدهای استاتیکی که در مجاورت ریزشبکه‌ها قرار دارد جواب‌گوی مدیریت بار و جلوگیری از حذف آن‌ها نشود، RMGCC بازآرایی را بر روی کلیدهای استاتیکی که ریزشبکه‌ها را به ناحیه مشترک تبادل توان متصل می‌کند، انجام می‌دهد.

نکته‌ی حائز اهمیت در اتصال ریز شبکه‌ها با هم، تغییرات ناخواسته در ولتاژ و فرکانس است. زمانی‌که دو یا چند ریزشبکه همسایه به‌هم متصل می‌شوند، ممکن است تغییرات ناگهانی در ولتاژ و فرکانس شبکه رخ دهد. از این‌رو پس از یافتن ساختار بهینه و اتصال ریز شبکه‌ها که مجدداً پخش بار صورت می‌گیرد، دو شرط زیر برای شبکه بررسی می‌شود:

$$\Delta V = |V_k - V_{\text{ref}}| \qquad k=1,\ldots k_{bus} \qquad (۲۱)$$
$$\Delta V \leq 0.1$$

$$\Delta f = |f - f_{ref}|$$
$$\Delta f \leq 1.5 \qquad (۲۲)$$

اگر روابط (۲۱) و (۲۲) برقرار نباشد ساختارهای به‌دست‌آمده برای اتصال ریزشبکه‌ها قابل قبول نیست و مجدداً زیرمسئله‌ی حذف بار فعال می‌شود.

۲-۲-۱- زیرمسئله حذف بار

به دلیل رخ دادن خطا و از کار افتادن واحدها و یا از دست دادن خطوط، ممکن است RMG با کمبود توان مواجه شود و قادر به تأمین همه‌ی بارهای خود نباشد. قابلیت حذف بار این امکان را به RMGCC می‌دهد که برای حفظ بارهای حیاتی بتواند بارهای غیر ضروری شبکه را تا زمان بازیابی سیستم قطع کند.

الگوریتم کلی حذف بار در RMG مورد نظر به صورت زیر است:

۱. اولویت بندی بارها بر اساس درجه اهمیت آن‌ها:

این اولویت‌بندی کمک می‌کند تا بارها براساس درجه اهمیت دسته‌بندی شوند و RMGCC بتواند به کمک این درجه‌بندی، به ترتیب از بارهای غیرضروری، شروع به حذف بار کند.

۲. محاسبه ظرفیت توان در دسترس RMG در حالت جزیره‌ای (Available power):

مجموع کل توان اکتیو در در دسترس در لحظه‌ای که در شرایط اضطرای هستیم و بایستی حذف بار صورت گیرد، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{AP} = \sum_i P_i + P_{wind} + P_{bat} \quad (۲۳)$$

۳. محاسبه تابع حذف بار (Load-shedding function):

میزان توانی که RMGCC می‌تواند از شبکه حذف کند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{shed} = \sum_l P_{load_l} - P_{AP} \quad (۲۴)$$

با توجه به اینکه در رابطه P_{AP}، توان در دسترس شبکه به اضافه‌ی توان تلف شده در خطوط در نظر گرفته شده است، تابع حذف بار به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{shed} = (1+\alpha)\left[\sum_l P_{load_l} - P_{AP}\right] \quad (۲۵)$$

α یک عدد مابین صفر و یک ($0 \le \alpha \le 1$) است که اثرات تلفات خطوط را در میزان توان حذف شده نشان می‌دهد.

۴. محاسبه مجموع بارهای غیر ضروری شبکه:

RMGCC مجموع کل بارهای غیر ضروری شبکه را محاسبه می‌کند و سپس مقدار توانی که باید حذف شود، با این میزان توان مقایسه می‌کند:

$$P_{shed} \le \sum P_{load_{non-essential}} \quad (۲۶)$$

اگر رابطه (۲۶) برقرار باشد، برنامه حذف بار به درستی انجام شده‌است و از بارهای غیرضروری شبکه این میزان توان حذف می‌شود.

اگر رابطه (۲۶) برقرار نباشد، مجموع بارهای حساس و غیرضروری RMG محاسبه می‌شود:

$$P_{shed} \le \sum P_{load_{non-essential}} + P_{load_{sensitive}} \quad (۲۷)$$

اگر رابطه بالا برقرار باشد علاوه بر بارهای غیرضروری، RMGCC از بارهای حساس RMG نیز حذف می‌کند.

۳- روش پیشنهادی

همان‌گونه که در قسمت‌های قبلی بیان شد، در این مقاله برنامه‌ریزی ریزشبکه در دو حالت عادی و اضطراری مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت قبلی فرمولاسیون شامل تابع هدف و قیود مربوطه برای هر دو حالت بیان شد. در این قسمت به دنبال ارائه الگوریتم مناسب جهت حل مسئله برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های RMG هستیم. در شرایط کار عادی، RMGCC به دنبال این است که با مدیریت توپولوژی شبکه، بهینه‌ترین ساختار شبکه را بیابد به گونه‌ای که هزینه‌های ریز شبکه به حداقل برسد. جهت حل مسئله بازآرایی و یافتن بهینه‌ترین ساختار شبکه در حالت کار عادی، از الگوریتم TVAC-PSO[11] استفاده می نماییم که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- الگوریتم TVAC-PSO

مسئله‌ی بازآرایی یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی با قیود مختلف است. منظور از حل مسئله‌ی بازآرایی یافتن بهینه‌ترین چیدمان کلیدهای موجود در سطح شبکه است. در سیستم‌های واقعی به دلیل تعداد بالای کلیدهای موجود در سطح شبکه، یافتن جواب بهینه یک امر زمان‌بر و بسیار طولانی می‌باشد. از این‌رو از الگوریتم‌های هوشمند برای حل مسئله بازارایی استفاده می‌شود. در این الگوریتم‌ها اعداد باینری 0 و 1 به کلیدها نسبت داده می شود که در صورت بسته بودن 1، و در صورت باز بودن 0 خواهند شد.

TVAC-PSO یکی از نسخه های جدید الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) کلاسیک است. PSO از جمله الگوریتم‌های هوشمند بر پایه‌ی رفتار اجتماعی ذرات (پرندگان و ماهیان) است که توسط Kennedy و Eberheart در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار ارائه شد [۱۷]. در PSO هر ذره بر اساس اطلاعات خود و اطلاعاتی که از اطراف دارد درصدد یافتن بهترین موقعیت است. PSO از یک جمعیت اولیه تصادفی شامل تعداد زیادی از ذرات شروع می شود. برای هر ذره مانند j، در تکرار kام، موقعیت $x_j(t)$ و سرعت $V_j(t)$ تعریف می‌شود. بهترین جواب به‌دست‌آمده برای ذره j در تکرار kام، تحت عنوان $P^k_{best_j}$ تعریف خواهد شد. در میان همه‌ی $P^k_{best_j}$های به‌دست‌آمده برای ذره j ($P^k_{best_j} = \{P^k_{best_{j1}}, P^k_{best_{j2}}, ...P^k_{best_{jN}}\}$)، بهترین مقدار تحت عنوان G^k_{best} ذخیره می‌شود. هر ذره برای رسیدن به جواب بهینه‌تر از طریق اطلاعات فردی و اطلاعاتی که از سایر ذرات اطراف دریافت می‌کند،

موقعیت و سرعت خود را به‌روز می‌کند. سرعت و موقعیت جدید ذره j به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_j(t+1)=\omega\times V_j(t)+C_1\times rand_1\times\left(P_{best_j}^k-x_j(t)\right)+ C_2\times rand_2\times\left(G_{best}^k-x_j(t)\right) \quad (۲۸)$$

$$x_j(t+1)=x_j(t)+V_j(t+1) \quad (۲۹)$$

در روابط (۲۸) و (۲۹) داریم:

x_j (t) و V_j (t) : به ترتیب، موقعیت و سرعت اولیه ذره j.

$rand_1$ و $rand_2$: اعداد تصادفی مابین 0 و 1.

C_1 و C_2 : به ترتیب، ضرایب رفتار فردی و اجتماعی ذره.

ω : ضریب اینرسی. که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\omega=\omega_{\min}+\frac{Iter_{\max}-Iter}{Iter_{\max}}\left(\omega_{\max}-\omega_{\min}\right) \quad (۳۰)$$

در رابطه (۳۰)، $Iter_{\max}$ حداکثر تعداد تکرار ا ست. با توجه به اینکه ω به صورت یک ضریب کاهشی است و در هر مرحله کاهش می‌یابد، $\omega_{\min}$ و $\omega_{\max}$ به ترتیب مقدار اولیه و نهایی ω هستند.

یکی از نکات کلیدی در استفاده از الگوریتم PSO، تنظیم پارامترهای C_1 و C_2 است که تنظیم این پارامترها می‌تواند نقش اساسی در رسیدن به جواب بهینه و همچنین کاهش زمان پاسخگویی داشته باشد [۱۸]. از این‌رو محققین به دنبال مدل‌های جدید PSO هستند که بتوان با تنظیم هرچه بهتر پارامترهای آن، رسیدن به جواب بهینه‌تر را بهبود بخشند. یکی از مدل‌های جدید PSO، الگوریتم تجمیع ذرات به همراه ضرایب شتاب متغیر با زمان (TVAC-PSO) است. در این الگوریتم ضرایب C_1 و C_2 با دقت بیشتری و از طریق روابط (۳۱) و (۳۲) به‌دست می‌آیند:

$$C_1=c_{1i}+\frac{Iter}{Iter_{\max}}\left(c_{1f}-c_{1i}\right) \quad (۳۱)$$

$$C_2=c_{2i}+\frac{Iter}{Iter_{\max}}\left(c_{2f}-c_{2i}\right) \quad (۳۲)$$

در روابط بالا c_{1i} و c_{2i} مقادیر اولیه و نهایی ضریب فردی، و c_{1f} و c_{2f} نیز مقادیر اولیه و نهایی ضریب اجتماعی هستند.

۳-۲- حل مسئله در حالت کار عادی

روش کلی حل مسئله در این حالت در قالب فلوچارت شکل ۴ نشان داده شده است. مراحل انجام به کار به صورت زیر است:

گام اول- واردکردن اطلاعات سیستم نظیر اطلاعات خطوط، میکروتوربین‌ها و ...

گام دوم- مدل‌سازی سرعت باد و توان تولیدی واحد بادی سناریو بر اساس مدل ARMA طبق [۱۳]

گام سوم- تعیین جمعیت اولیه و تنظیم پارامترهای الگوریتم TVAC-PSO

گام چهارم- شروع الگوریتم برای اولین تکرار و اجرای پخش بار برای سناریو مورد نظر

گام پنجم- بررسی کلیه قیود (۲) تا (۱۴). اگر قیود مورد نظر برقرار باشند، الگوریتم بررسی ساختار شعاعی شبکه بررسی می‌شود.

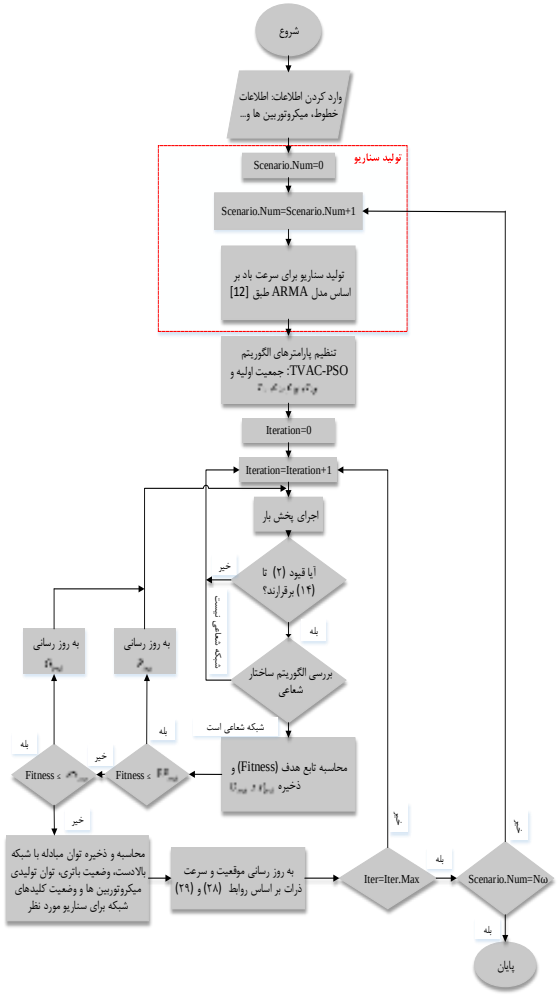
گام ششم- محاسبه تابع هدف (Fitness function) و ذخیره کردن P_{best} و G_{best} برای تکرار مورد نظر

گام هفتم- مقایسه مقادیر به دست آمده به ازای P_{best} و G_{best} (FP_{best} , FG_{best}) با تابع هدف و به‌روز رسانی آن‌ها در صورت نیاز

گام هشتم- ذخیره ساختار به‌دست‌آمده و وضعیت کلیدها، توان تولیدی میکروتوربن‌ها در هر ساعت، وضعیت شارژ و د شارژ باتری در هر ساعت و توان مبادله شده مابین RMG با شبکه بالادست در هر ساعت

گام نهم- به روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات بر اساس روابط (۲۸) و (۲۹)

گام دهم- بررسی شرط پایان. آیا به تعداد لازم مسئله تکرار شده است یا خیر. در صورت پایان تکرارها شرط پایان تعداد سناریوهای مورد نیاز بررسی می‌شود، در صورت برقرار نبودن شرط پایان برای تکرار مسئله به گام چهارم برمی‌گردد. در صورت پایان نیافتن تعدا سناریوها نیز مسئله به گام دوم باز می‌گردد و این روند تکرار می‌شود.



شکل ۴: الگوریتم حل مسئله برنامه‌ریزی RMG در حالت اتصال به شبکه

۳-۳- حل مسئله در شرایط اضطراری

همان‌طور که بیان شد در زمان رخ دادن خطا، امکان مواجه شدن با کمبود توان و در نتیجه حذف بار به مراتب بیشتر از حالت کار عادی است. راه حل ارائه شده در این مقاله تبدیل RMG به چندین ناحیه مختلف است، به‌گونه‌ای که منابع مختلف موجود در سطح RMG به بارهای مشخصی سرویس‌دهی کنند. به این‌ترتیب با تبدیل شبکه به نواحی کوچک‌تر، مدیریت بار شبکه راحت‌تر خواهد بود و می‌توان با مدیریت صحیح نحوه اتصال این نواحی با هم، حذف بار را صفر و یا به حداقل رسانید. نا گفته نماند که الگوریتم ارائه شده می‌تواند برای شبکه‌های توزیع آینده که متشکل از ریز شبکه‌های مختلفی هستند و در همسایگی هم عمل می‌کنند نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر این ریز شبکه‌های همسایه که معمولاً در تأمین بارهای خود دچار مشکل می‌شوند، به عنوان یک روش مدیریت بار می‌توانند طبق الگوریتم ارائه شده به تبادل و اشتراک بپردازند.

الگوریتم کلی برنامه‌ریزی RMG در حالت رخ‌دادن خطا در ساختار آن در شکل ۵ نشان داده شده است. روند کلی به ترتیب زیر است:

گام اول- تشخیص رخ‌دادن خطا و تبدیل RMG به نواحی از پیش تعیین شده به کمک قطع کلیدهای استاتیکی. مطابق با شکل ۳، RMGCC به محض دریافت سیگنال خطا توسط کنترلرهایی که در هر ناحیه قرار دارند، RMG را از شبکه اصلی جدا می‌کند و با قطع کلیدهای استاتیکی معیین، RMG را به نواحی از پیش تعیین شده تبدیل می‌کند.

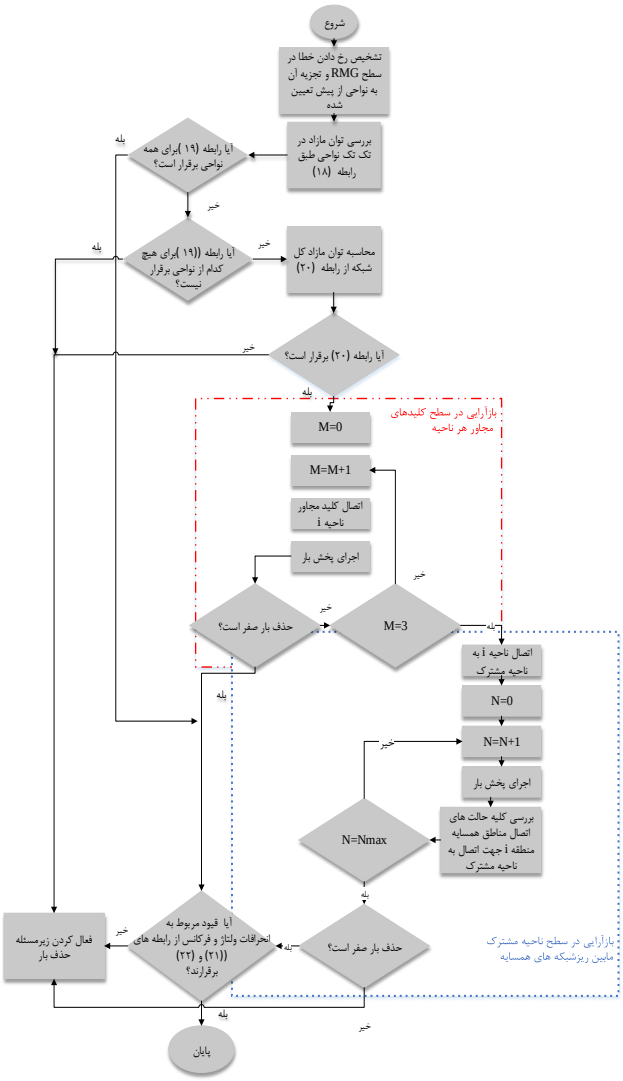
گام دوم- محاسبه توان مازاد در همه نواحی طبق رابطه (۱۹). اگر در همه نواحی این رابطه برقرار باشد، یعنی کمبود توان در شبکه موجود نیست و در صورت برقراربودن قید انحرافات ولتاژ و فرکانس، مناطق می‌توانند به صورت ایزوله به کار خود ادامه دهند. اگر رابطه‌ی (۱۹) برای هیچ‌کدام از نواحی برقرار نباشد، در همه‌ی ناحیه‌ها با کمبود توان مواجه هستیم، از این‌رو RMGCC زیرمسئله‌ی حذف بار فعال می‌کند. اگر رابطه‌ی (۱۹) تنها برای یک ناحیه برقرا نباشد، مسئله‌ی بازآرایی در دو سطح بررسی می‌گردد و الگوریتم وارد گام سوم می‌شود.

گام سوم- بازآرایی در سطح کلیدهای استاتیکی مجاور ریز شبکه‌ها. تعیین گام تکرار و بستن اولین کلید مجاور ریز شبکه i ام و اجرای پخش بار. RMGCC در اولین گام، یکی از کلیدهای مجاور ناحیه i را وصل می‌کند. اگر این امر منجر به صفر شدن حذف بار گردد مسئله حل می‌گردد، در غیر این صورت این فرآیند وارد تکرار دوم می‌شود. در تکرار دوم، دومین کلید مجاور ناحیه‌ی iام بسته می‌شود (توجه شود که در کنار هر ناحیه ۲ کلید استاتیکی جهت اتصال مجزای نواحی تعبیه شده است). اگر بسته شدن دومین کلید هم منجر به صفر شدن حذف بار نگردد، در تکرار سوم (M=3) هر دو کلید مجاور همزمان بسته می‌شوند و ناحیه iام به دو ناحیه متصل می‌گردد.

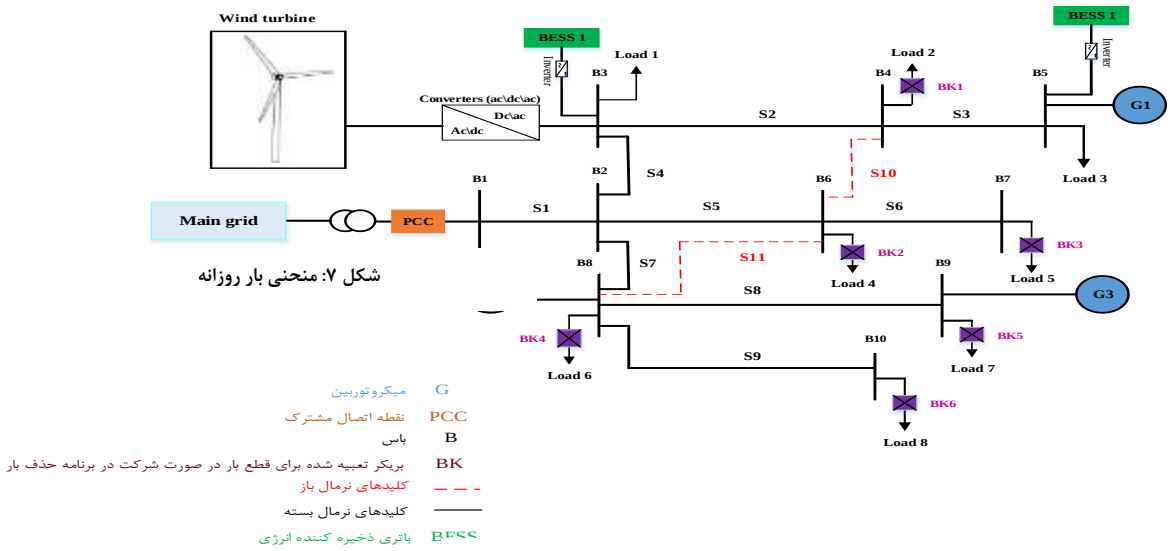
گام چهارم- در صورت جواب‌گو نبودن بازآرایی در سطح اول، RMGCC بازآرایی را در سطح ناحیه مشترک انجام می‌دهد. به این ترتیب ابتدا ریز شبکه‌ی مورد نظر به ناحیه‌ی مشترک تبادل توان وصل می‌شود و سپس گام تکرار تعیین می‌شود (منظور از گام تکرار تعداد حالت ممکن برای اتصال نواحی به ناحیه‌ی مشترک است N=N+1)، سپس پخش بار مجدداً اجرا می‌شود تا وضعیت نواحی مختلف مشخص گردد و الگوریتم وارد گام پنجم شود.

گام پنجم- بررسی کلیه حالت‌های ممکن برای اتصال نواحی به سطح مشترک طبق رابطه‌ی (۱۵) و محاسبه‌ی میزان توان حذف شده در هر حالت.

گام ششم- در بین همه‌ی حالت‌های ممکن بهینه‌ترین ساختار که منجر به صفرشدن حذف بار می‌شود انتخاب می‌شود و در صورت برقراری قید انحرافات ولتاژ و فرکانس، ساختار قابل قبول است. در غیر این صورت زیرمسئله حذف بار فعال می‌شود.



شکل ۵: الگوریتم حل مسئله در شرایط اضطراری و تبدیل آن به چندین ریزشبکه همسایه



شکل ۶: ساختار ریزشبکه ۱۰ باسه

۴- شبیه‌سازی و نتایج

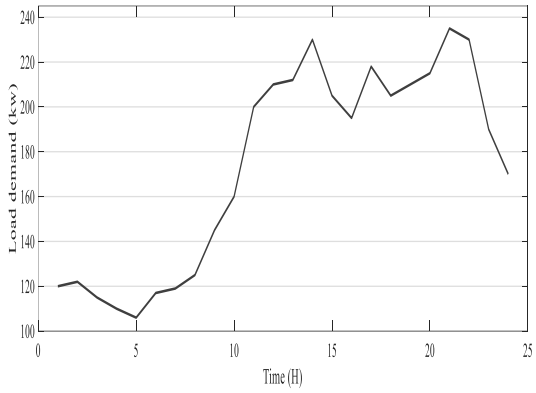
روش‌های پیشنهادی در قسمت سوم برای هر دو حالت کاری در دو ریز شبکه قابل بازآرایی ۱۰ و ۳۳ با سه شعاعی پیاده شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. مسئله بازآرایی بهینه توسط الگوریتم هوشمند TVAC-PSO در نرم افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. در ابتدا با توجه حضور واحد بادی به عنوان تنها پارامتر عدم قطعیت، همانند[۱۳] به روش تولید سناریو تعداد مناسبی سناریو برای سرعت باد در هر ساعت تولید می شود تا توان تولیدی واحد بادی به‌دست آید و سپس از این مقادیر برای برنامه‌ریزی شبکه استفاده می‌شود.

برای مشخص شدن کارایی روش‌های پیشنهادی در هر دو حالت کاری، نتایج به دست آمده با روش‌های مشابه در مراجع مختلف مقایسه شده است.

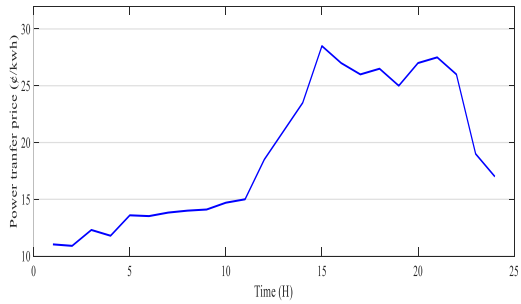
۴-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی در عملکرد نرمال

شبکه مورد نظر یک شبکه ۱۰ باسه‌ی شعاعی ۲۰kV/ ۴۰۰V است که شامل: ۱۱ کلید (۲ کلید نرمال باز و ۹ کلید نرمال بسته)، ۳ میکروتوربین، ۱ واحد بادی و ۲ عدد باتری ذخیره‌کننده‌ی انرژی است. ریز شبکه از طریق کلید PCC با شبکه‌ی بالادست در ارتباط است. در ساختار ریزشبکه ۸ بار با سطوح مختلف غیرضروری، حساس و بحرانی وجود دارند.

ساختار کلی ریزشبکه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده‌است. مشخصات شبکه فوق شامل مشخصات خطوط، باتری‌های ذخیره‌کننده انرژی، مشخصات میکروتوربین‌ها و مشخصات واحد بادی در [۱۳] بیان شده است. منحنی بار ریز شبکه و همچنین قیمت روزانه برق به‌ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است.



شکل ۷: منحنی بار روزانه



شکل ۸: قیمت روزانه برق

جهت به کارگیری الگوریتم TVAC-PSO برای حل مسئله بازآرایی، پارامترهای آن به صورت زیر تعیین می‌گردد.

جدول ۱ : پارامترهای الگوریتم TVAC-PSO

پارامتر	مقدار
c_1, c_2	۲
حداکثر مقدار ضریب اینرسی($\omega_{\max}$)	۰/۹
حداقل مقدار ضریب اینرسی (ω_{min})	۰/۴

همان‌گونه که بیان شد در حالت اتصال به شبکه هدف از برنامه‌ریزی بهینه RMG تحت فرآیند بازآرایی، حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری و خرید برق از شبکه بالادست است. طبق الگوریتم پیشنهادی برای این حالت کاری، RMGCC در هر ساعت وضعیت کلیدهای شبکه، وضعیت کاری میکروتوربین‌ها، باتری‌ها و میزان توان مبادله‌شده با شبکه‌ی بالادست را تعیین می‌کند. نتایج حاصل از بازآرایی برای ۲۴ ساعت در جدول ۲آمده است. همان‌طورکه مشاهده می شود برای حفظ ساختار شعاعی و جلوگیری از حلقه در هر ساعت ۲ عدد از کلیدهای RMG در حالت باز قرار دارند. همچنین بنابر قید حداکثر تعداد توپولوژی (رابطه‌ی ۱۴)، حداکثر تعداد توپولوژی که RMG در طول روز می‌تواند داشته باشد نباید از $Y_{\max}^{sw}$ بیشتر گردد (در حالت اتصال به شبکه بالادست $Y_{\max}^{sw} = 5$ در نظر گرفته شده‌است).

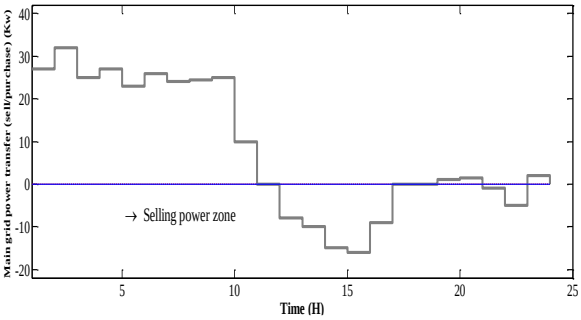
جدول ۲: نتایج بازآرایی ۲۴ ساعته برای حالت نرمال

ساعت	کلیدهای باز	ساعت	کلیدهای باز
۱	S_{10} S_{11}	۱۳	S_4 S_5
۲	S_{10} S_{11}	۱۴	S_5 S_{10}
۳	S_{10} S_{11}	۱۵	S_5 S_{10}
۴	S_{10} S_{11}	۱۶	S_5 S_{10}
۵	S_{10} S_{11}	۱۷	S_5 S_{10}
۶	S_{10} S_{11}	۱۸	S_{10} S_{11}
۷	S_{10} S_{11}	۱۹	S_{10} S_{11}
۸	S_{10} S_{11}	۲۰	S_{10} S_{11}
۹	S_{10} S_{11}	۲۱	S_{10} S_{11}
۱۰	S_4 S_5	۲۲	S_{10} S_{11}
۱۱	S_4 S_5	۲۳	S_4 S_5
۱۲	S_4 S_5	۲۴	S_4 S_5

جدول ۳: وضعیت در مدار گرفتن میکوتوربین‌ها و BESSهای در حالت اتصال به شبکه

منبع / ساعت	G1	G2	G3	BESS 1	BESS 2
1	1	0	0	-1	-1
2	1	0	0	-1	-1
3	1	0	0	-1	-1
4	1	0	0	-1	0
5	1	0	0	-1	0
6	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0
11	1	1	0	0	0
12	1	1	0	+1	0
13	1	1	1	+1	+1
14	1	1	1	+1	+1
15	1	1	1	+1	+1
16	1	1	1	+1	0
17	1	1	1	0	-1
18	1	1	1	0	-1
19	1	1	1	0	-1
20	1	1	1	0	0
21	1	1	1	0	+1
22	1	1	1	0	+1
23	1	1	0	0	+1
24	1	1	0	0	0

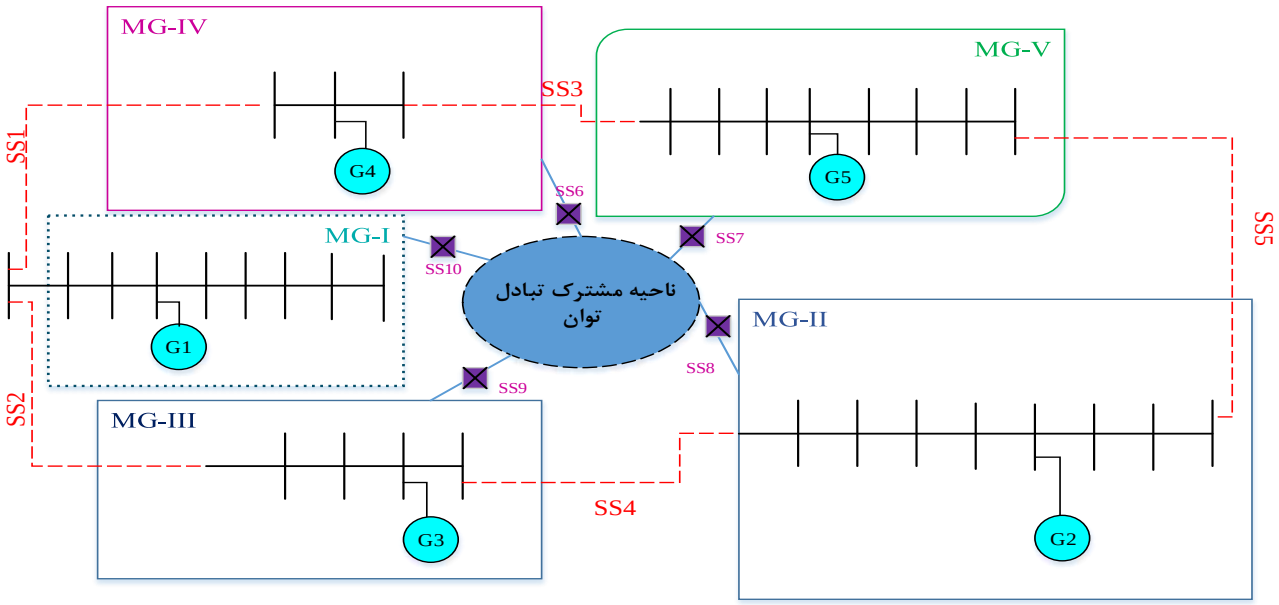
وضعیت در مدار قرارگرفتن میکروتوربین‌ها و همچنین وضعیت کاری باتری‌ها در جدول۳ آمده‌است. برای میکروتوربین‌ها اعداد 1 و 0 به ترتیب بیان‌گر روشن و خاموش بودن واحد است. برای باتری ذخیره‌کننده انرژی حالت دشارژ، شارژ و حالت خنثی (بی‌کاری) به ترتیب با 1، 1- و 0 نشان داده شده‌است. همان‌گونه که بیان شد در حالت اتصال به شبکه، RMG می‌تواند با شبکه بالادست تبادل توان داشته باشد. با توجه به اینکه قیمت خرید و فروش برق از (به) شبکه بالادست در طول روز متفاوت است، RMGCC در ساعاتی که قیمت خرید بالا است توان کمتری از شبکه بالادست خریداری می‌کند؛ در عوض توان تولیدی و ساعت‌های در مدار قرار گرفتن میکروتوربین‌ها و ساعت‌هایی که باتری‌های ذخیره‌کننده باید در حالت دشارژ قرار گیرد، افزایش می‌یابد. شکل ۹، kw توان رد و بدل شده با شبکه بالادست را در طول روز نشان می‌دهد.



شکل ۹: میزان مبادل توان ریزشبکه و شبکه بالادست

از روی منحنی قیمت روزانه خرید و فروش برق و شکل بالا مشاهده می‌شود که توان خریداری‌شده از شبکه‌ی بالادست از ساعت ۱۱ به بعد بسیار کمتر از ساعت‌هایی است که هزینه خرید برق ارزان است (ساعت ۱ تا ۱۰). در واقع هرگاه ضریب هزینه میکروتوربین‌ها کمتر از قیمت خرید برق باشد، RMGCC میکروتوربین‌های خود را وارد مدار می‌کند تا توان بیشتری تولید و در صورت امکان توان مازاد را به شبکه بفروشد.

با توجه به قیمت بالای برق، RMGCC با فروش مازاد توان موجود به شبکه بالادست در بازه بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۷ سود قابل ملاحظه‌ای دریافت کند. برای بازه بین ساعت ۲۱ تا ۲۳ نیز این امر قابل مشاهده است. مقدار کل تابع هزینه‌ی رابطه ۹.۳ برابر **۴۰/۴۱ دلار** است.



شکل ۱۰: ساختار ریزشبکه ۳۳ باسه با قابلیت تبدیل به ۵

۴-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی در عملکرد اضطراری

در این حالت برنامه‌ریزی بر روی یک ریزشبکه ۳۳ باسه با قابلیت تبدیل به ۵ ریزشبکه همسایه اعمال می‌گردد. ساختار شبکه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

نتایج شبیه سازی بر روی این سیستم در ۳ حالت که در هر کدام به ترتیب ۱، ۲ و ۳ ناحیه با مشکل کمبود توان مواجه هستند، انجام می‌گیرد.

حالت اول) در این حالت تنها یک ناحیه با مشکل کمبود توان مواجه است. طبق الگوریتم پیشنهادی در ابتدا بایستی میزان UPC برای همه‌ی نواحی محاسبه و رابطه‌ی (۱۹) برای $\alpha = 0.3$ بررسی شود. نتایج محاسبه‌ی UPC برای ۵ ریزشبکه، به صورت جدول ۴ خواهد بود.

جدول ۴: میزان توان در دسترس و UPC برای حالت اول

	میزان بار هر ناحیه	کل توان دردسترس	Marginal UPC ($\sum \alpha P_{gen-MG_i}^{\max}$)	UPC
MG-I	1	2.2	0.95	1.2
MG-II	0.65	1.5	0.75	0.85
MG-III	0.8	1.2	0.33	0.4
MG-IV	0.9	0.95	0.33	0.05
MG-V	0.65	1.05	0.33	0.4

همان‌گونه که از جدول ۴مشاهده می‌شود، ناحیه‌ی ۴ با مشکل کمبود توان مواجه است. برای عملکرد صحیح کل نواحی ۵گانه بایستی ۰/۲۸ مگاوات از ریزشبکه‌ی ۴ حذف شود. الگوریتم پیشنهادی بازآرایی را در سطح کلیدهای استاتیکی مجاور ریزشبکه‌ها انجام می‌دهد. در اولین تکرار با وصل شدن کلید SS1، ۰/۲۵ مگاوات از ناحیه‌ی ۱ به ناحیه‌ی ۴ منتقل می‌شود، به این ترتیب UPC_4 به ۰/۳ افزایش و UPC_1 به ۰/۹۵ کاهش می‌یابد. در تکرار دوم کلید SS3 وصل می‌شود. توان مبادله شده مابین نواحی ۴ و ۵ موجب می‌گردد که UPC_4 به ۰/۱۲ افزایش و UPC_5 به مقدار مرزی خود یعنی ۰/۳۳ برسد. با توجه به عدم صفر شدن حذف بار و رعایت نشدن UPC همه‌ی ریزشبکه‌ها، در تکرار سوم هر دو کلید مجاور ناحیه‌ی ۴ (کلیدهای SS1 و SS3) همزمان بسته می‌شود. به این ترتیب ۰/۰۷ مگاوات از ناحیه‌ی ۵ و ۰/۲۱ مگاوات از ناحیه‌ی ۱ به ناحیه‌ی ۴ منتقل می‌شود تا UPC_4 به ۰/۳۳ برسد. با توجه به اینکه در این وضعیت UPC کلیه‌ی ریزشبکه‌ها بیشتر از حد تعیین شده‌است و در اثر تبادل حذف بار صفر می‌باشد، نیازی به انجام بازآرایی در سطح دوم نیست و الگوریتم متوقف می‌شود. در اثر این تبادل توان هزینه‌ی ریزشبکه‌ی ۴ام از ۴۶۲/۷ دلار به ۵۳۳/۷ دلار افزایش می یابد. این افزایش هزینه (مجموع هزینه تولید خود ناحیه و هزینه خرید برق از ریزشبکه‌های مجاور) در برابر صفر شدن عدم تعادلِ منجر به حذف بار، ناچیز خواهد بود.

حالت دوم) در این حالت ۲ ریز شبکه با مشکل کمبود توان مواجه هستند. اطلاعات شبکه در این حالت به صورت جدول ۵ است.

جدول ۵: میزان توان در دسترس و UPCمحاسبه شده در یک ساعت دلخواه برای حالت دوم

	میزان بار هر ناحیه	کل توان دردسترس	Marginal UPC $\sum \alpha P_{gen-MG_i}^{\max}$	UPC
MG-I	0.98	2.38	0.95	1.4
MG-II	0.7	1.5	0.75	0.8
MG-III	0.64	1	0.33	0.36
MG-IV	0.93	1	0.33	0.08
MG-V	0.92	1	0.33	0.08

همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می شود، ریز شبکه‌های ۴ و ۵ با مشکل کمبود توان مواجه هستند و برای عملکرد عادی همه‌ی مناطق ۰/۵ مگاوات باید از کل سیستم حذف شود. از این‌رو الگوریتم به دنبال یافت بهترین آرایش کلیدهای SS1، SS5 و SS3 است تا حذف بار شبکه صفر شود. در سطح اول بازآرایی، الگوریتم کلیدهای مجاور ریزشبکه‌ی ۴ را بررسی می‌کند. اتصال کلید SS3 که مابین ریز شبکه‌های ۴ و ۵ است امری منطقی نیست. در تکرار دوم با اتصال کلید SS1 ریزشبکه‌ی ۴ و ۱ به هم وصل می‌شوند. در این حالت UPC_4 به ۰/۳۷ افزایش می‌یابد و UPC_1 به ۱/۱۱ کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این تکرار حذف بار صفر می شود، الگوریتم متوقف می شود. برای ریز شبکه‌ی ۵ نیز همین روال تکرار خواهد شد. در تکرار دوم با اتصال کلید SS5 ریز شبکه‌های ۲ و ۵ به هم وصل می شوند. در این حالت UPC_5 به ۰/۱۳ افزایش و UPC_2 به ۰/۷۵کاهش می‌یابد و به حد مرزی خود می‌رسد. مشخص است که در تکرار سوم نیز میزان حذف بار ریزشبکه‌ی ۵ صفر نمی‌شود، از این‌رو الگوریتم وارد سطح دوم خواهد شد و بازآرایی در سطح ناحیه‌ی مشترک انجام می‌گیرد. طبق رابطه‌ی (۱۵) با توجه به اینکه $N' = 2$ است، تعداد حالت برابر $2^{5-2} - 1 = 7$ خواهد بود. نتایج حاصل از بازآرایی در سطح دوم، میزان UPC کلیه‌ی ریزشبکه‌ها و میزان حذف بار بعد از بازآرایی در جدول ۶ آمده است. همان‌طور که مشاهده می شود، در حالت‌های ۴ و ۷ حذف بار صفر شده است. حالت ۷ به دلیل تغییرات فرکانس ناشی از اتصال ۵ ناحیه قابل قبول نیست. لذا حالت ۴ به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌گردد.

حالت سوم) در این حالت سه ریزشبکه از ۵ ریزشبکه‌ی همسایه با مشکل کمبود توان مواجه خواهند بود. اطلاعات شبکه در این حالت به صورت جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۷: میزان توان در دسترس و UPC در حالت سوم

	میزان بار هر ناحیه	کل توان دردسترس	Marginal UPC ($\sum \alpha P_{gen-MG_i}^{\max}$)	UPC
MG-I	۱/۰۵	۲/۴	۰/۹۵	۱/۳۵
MG-II	۰/۶۵	۱/۵	۰/۷۵	۰/۸۵
MG-III	۰/۸۱	۱	۰/۳۳	۰/۱۹
MG-IV	۰/۹۳	۱	۰/۳۳	۰/۰۸
MG-V	۰/۹۲	۱	۰/۳۳	۰/۰۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود نواحی ۳، ۴ و ۵ با مشکل کمبود توان مواجه هستند. قبل از فرآیند بازآرایی و اتصال ریز شبکه‌ها، ۰/۶۴ مگاوات حذف بار باید در شبکه صورت گیرد. انجام فرآیند بازآرایی در سطح کلیدهای مجاور منجر به کاهش حذف بار به ۰/۱۵ مگاوات می‌شود. با توجه به عدم صفر شدن حذف بار، الگوریتم وارد سطح دوم می‌شود و بازآرایی در سطح ناحیه مشترک صورت می‌گیرد. طبق رابطه‌ی (۱۵) با تواجه به اینکه N' برابر ۳ است، تعداد کل حالت‌های ممکن جهت اتصال ریزشبکه‌ها $2^{5-3} - 1 = 3$ خواهد بود. نتایج حاصل از بازآرایی و میزان حذف بار سیستم در هر ۳ حالت به صورت جدول ۸ است.

جدول ۸: نتایج حاصل از بازآرایی برای ۳ وضعیت ممکن در سیستم ۳۳ باسه برای حالت سوم

حالت	۱	۲	۳
UPC_1	۰/۹۵	۱/۳۵	۰/۹۵
UPC_2	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۵
UPC_3	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۳
UPC_4	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۶
UPC_5	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۶
کلیدهای بسته	SS6 SS7 SS9 SS10	SS6 SS7 SS9 SS8	SS6 SS7 SS8 SS9 SS10
میزان حذف بار (MW)	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۱۴

جدول ۶: نتایج حاصل از بازآرایی برای ۷ وضعیت ممکن در سیستم ۳۳ باسه برای حالت دوم

حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
UPC_1	۰/۹۵	۱/۴	۱/۴	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۴	۰/۹۶
UPC_2	۰/۸	۰/۷۵	۰/۸	۰/۷۵	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷۵
UPC_3	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۵
UPC_4	۰/۳۳	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۳۳
UPC_5	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۳۳
کلیدهای بسته	SS6 SS7 SS10	SS6 SS7 SS8	SS6 SS7 SS9	SS7 SS6 SS10 SS8	SS6 SS7 SS10 SS9	SS6 SS7 SS8 SS9	SS6 SS7 SS9 SS8 SS10
میزان حذف بار (MW)	۰/۰۵	۰/۴۵	۰/۴۷	۰	۰/۰۲	۰/۴۲	۰

همان‌گونه که در جدول بالا م شاهده می شود، در و ضعیت ۳ام که همه‌ی نواحی ۵گانه به ناحیه مشترک متصل می شوند میزان حذف بار کمترین مقدار اســـت و از میزان حذف بار به‌دســـت آمده از بازآرایی کلیدهای مجاور (۰/۱۵ مگاوات) کمتر اســـت و به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به پیدایش ریزشـــبکه های الکتریکی، کنترل و برنامه‌ریزی این شـبکه‌ها یکی از چالش‌های اسـاسـی برای شـبکه‌های قدرت به شـمار می‌آید. در کنار مدیریت منابع جهت برنامه‌ریزی بهینه ریزشـــبکه‌های الکتریکی، قابلیت ســـاختار آن‌ها از طریق کلیدهای قابل کنترل از راه دور موجب پیدایش نســـل جدیدی از ریزشـــبکه ها تحت عنوان ریزشبکه‌های قابل بازآرایی گردیده‌است. در این مقاله برنامه‌ریزی بهینه ریزشـــبکه‌های الکتریکی قابل بازآرایی در دو حالت نرمال و اضـــطراری تحت فرآیند بازآرایی مورد بررسی قرار گرفته‌است. عملکرد ریزشبکه‌ها در شرایط اضطراری و هنگامی‌که هیچ‌گونه تبادلی با شبکه بالادست وجود ندارد باید با هدف تأمین حداکثری بارها صـــورت پذیرد. از این‌رو در این مقاله یک بســـتر جدید برای ریزشـــبکه در شـــرایط اضـــطراری پیشنهاد شده‌است؛ به‌این‌ترتیب که ریزشبکه قابلیت تبدیل شدن به چندین ریزشبکه همسایه را دارد و ریزشبکه‌های همسایه می‌توانند در دو سطح (با ریزشبکه با ریزشبکه‌های مجاور و یا بستر مشترک توان) به تبادل بپردازند. پس از معرفی الگوریتم پیشنهادی برای هر دو حالت کاری، برنامه‌ریزی مربوطه بر روی یک ریزشـــبکه ۳۳ باســـه که قابلیت تبدیل به ۵ ریزشـــبکه‌ی همســـایه را در شـــرایط اضـــطراری دارد، پیاده گردید و نتایج حاصل نشان دهنده‌ی کارائی روش پیشنهادی در مقایسه با کارهای مشابه می‌باشد.

مراجع

[1] J. Pecas-Lopes, "Algorithms for state estimation for MV multimicrogrids," Advanced architectures and control concepts for more microgrids, 2007.

[2] R. Zamora and A. K. Srivastava, "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 2009-2018, 2010.

[3] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, "A centralized energy management system for isolated microgrids," IEEE Transactions on smart grid, vol. 5, pp. 1864-1875, 2014.

[4] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and D. Wong, "Multi-agent coordination for DER in MicroGrid," in Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, 2008, pp. 77-82.

[5] N. Nikmehr and S. N. Ravadanegh, "Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, pp. 1648-1657, 2015.

[6] J. Lopes, A. Madureira, N. Gil, and F. Resende, "Operation of Multi Microgrids," Microgrids: Architectures and Control, no. Cam C, ch. Operation, John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

[7] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," Proceedings of the IEEE, vol. 99, pp. 1074-1082, 2011.

[8] F. Shahnia, S. Bourbour, and A. Ghosh, "Coupling neighboring microgrids for overload management based on dynamic multicriteria decision-making," IEEE Transactions on smart grid, 2015.

[9] C. Wang, X. Yang, Z. Wu, Y. Che, L. Guo, S. Zhang, et al., "A highly integrated and reconfigurable microgrid testbed with hybrid distributed energy sources," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, pp. 451-459, 2016.

[10] S. S. Thale, R. G. Wandhare, and V. Agarwal, "A novel reconfigurable microgrid architecture with renewable energy sources and storage," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 1805-1816, 2015.

[۱۱] ت. فرهودی س. نجفی روادانق، "برنامه‌ریزی و تجدید آرایش بهینه در شبکه‌ای با ریزشبکه‌های چندگانه،" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۴۷، صفحه ۱۵۸۷-۱۵۹۸، ۲۰۱۸.

[12] X. Zhan, T. Xiang, H. Chen, B. Zhou, and Z. Yang, "Vulnerability assessment and reconfiguration of microgrid through search vector artificial physics optimization algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 62, pp. 679-688, 2014.

[13] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Ghasemzadeh, and E. Reihani, "Risk-based optimal scheduling of reconfigurable smart renewable energy based microgrids," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 101, pp. 415-428, 2018.

[۱۴] ف. رهبران، س. نجفی روادانق ,گ. قره‌پتیان، "طراحی بهینه ریزشبکه‌های به‌هم پیوسته در حضور پارکینگ خودروهای الکتریکی،" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز ,شماره ۴۸، صفحه ۱۱۵۳-۱۱۶۶، ۲۰۱۸.

[15] G. Valls, I. R. López, and L. F. Villar, "iLAND: An enhanced middleware for real-time reconfiguration of service oriented distributed real-time systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, pp. 228-236, 2013.

[16] L. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks," in Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on, pp. 575-578, 2002.

[17] J. Kennedy and R. Eberhart, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in Proceeding of the 1995IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.

[18] B. Mohammadi-Ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Iteration PSO with time varying acceleration coefficients for solving non-convex economic dispatch problems," International journal of electrical power & energy systems, vol. 42, pp. 508-516, 2012.

زیرنویس‌ها

[1] Distributed energy resource
[2] Energy management system
[3] Static switch
[4] Remotely controllable switch
[5] Reconfigurable microgrid
[6] Microgrid central controller
[7] Multi-Microgrid
[8] Point of common coupling
[9] Reconfigurable microgrid central controller
[10] Unused power capacity
[11] Time-varying acceleration coefficient particle swarm optimization