

کنترل بهینه سلسله‌مراتبی سطح سوم ریزشبکه با استفاده از پخش پویای جمعیت در بازار پیش‌رو

حمیدرضا صمدی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمود عبادیان^۲، دانشیار؛ سعید رضا گلدانی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - hrsamadi@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mahmoud_ebadian@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - sgoldani@birjand.ac.ir

چکیده: کنترل سلسله‌مراتبی، با تلفیقی از سیستم کنترل متمرکز و غیرمتمرکز، روش مناسبی برای کنترل ریزشبکه است. بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه به لحاظ اقتصادی وظیفه سطح سوم کنترل سلسله‌مراتبی است. در مدل بازار با روش پرداخت یکنواخت، پخش بهینه اقتصادی توان، بر پایه تساوی منفعت حدی منابع کنترل‌پذیر ریزشبکه استوار است. برای پیاده‌سازی این تساوی در بازار لحظه‌ای پیش‌رو، از پخش پویای جمعیت استفاده شده است. سهم هر منبع از تقاضا، متناسب با میزان شایستگی آن منبع است. شایستگی هر منبع، به توان نامی، ضریب هزینه و ضریب جریمه تلفات ناشی از سهم منبع در تلفات ریزشبکه بستگی دارد. برای محاسبه ضریب جریمه، دو روش تحلیلی ژاکوبین و عددی مقایسه شده است. با محاسبه منفعت حدی توسط روش پویای پخش توان و اطلاع از قیمت بازار لحظه‌ای خرید و فروش شبکه توزیع، مسیر مبادله انرژی بین ریزشبکه و شبکه توزیع مشخص می‌شود. در این مقاله یک شبکه شعاعی ۱۴ شینه با خطوط مقاومتی و پنج منبع کنترل‌پذیر متفاوت انتخاب شده است. مطابق فلوچارت، روشی مؤثر و بلادرنگ برای کنترل بهینه اقتصادی ریزشبکه در بازار لحظه‌ای پیش‌رو، با هدف بیشینه‌سازی منفعت ریزشبکه مطرح شده است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، کنترل بهینه سلسله‌مراتبی، پخش بار اقتصادی، پخش پویای جمعیت با تلفات.

Tertiary Hierarchical Optimal Control of Microgrid by Dynamic Population Dispatch in a Day-ahead Market

H. R. Samadi¹, PhD Student; Mahmud Ebadian², Associate Professor; S. R. Goldani³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hrsamadi@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mahmoud_ebadian@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: sgoldani@birjand.ac.ir

Abstract: Hierarchical control, with compilation of centralized and decentralized control system, is a suitable to control a microgrid. Economically optimal operation is the main task of tertiary hierarchical control of microgrid. In the uniform-price auction model, the economic power dispatch is based on the same marginal utility of distributed energy resources (DER) of microgrid. To implement this condition in a day-ahead real-time market, dynamic population dispatch are used. The share of demand for each source is according to its fitness. The fitness function of each source depends on nominal power, cost factor and penalty factor duo to the role of each source in increasing/decreasing power losses of the microgrid. To calculate the penalty factor, jacobian analytical method and a numerical one are compared. By calculating the marginal utility (minimum bid price of microgrid) through the dynamic power distribution method, and knowing the real-time market purchase and sell price of the distribution network, the energy exchange path between the microgrid and the distribution network is determined. In this paper, a 14-bus radial network with resistive lines and five controllable sources has been simulated. According to the results, an effective and real-time approach to optimally control a microgrid in a day-ahead market with the aim of maximizing the benefits of the microgrid has been proposed.

Keywords: Microgrid, hierarchical optimum control, economic dispatch, population dynamic dispatch with losses.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴

نام نویسنده مسئول: محمود عبادیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در دهه اخیر کاربرد ریزشبكة به دلایل مختلف از قبیل بهبود مسائل پایداری، امنیتی و اقتصادی شبکه برق سراسری، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، ابداع فناوری‌های جدید در سیستم‌های کنترل و مخابرات و سیاست‌های تشویقی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در تولید پراکنده رو به افزایش بوده‌است. از طرفی مدل‌های جدید بازار، سبب ایجاد فضای رقابتی در تولید پراکنده به‌ویژه در زمینه انرژی تجدیدپذیر شده‌است. استفاده ترکیبی از مولدهای تجدیدپذیر متغیر و غیرقابل کنترل (خورشیدی، بادی و ...) در کنار مولدهای کنترل‌پذیر سنتی (میکرو توربین، دیزل و ...)، افزایش ضریب اطمینان و امنیت ریزشبكة را به‌همراه خواهد داشت. از طرفی یکی از اهداف بلندمدت، افزایش سهم منابع تجدیدپذیر نسبت به منابع سنتی است. از دید بخش خصوصی نیز یکی از عوامل مهم در سرمایه‌گذاری، تولید اقتصادی با لحاظ تمامی محدودیت‌های فنی و امنیتی است.

ریزشبكة در دو حالت متصل و منفصل از شبکه سراسری بهره‌برداری می‌شود. در حالت متصل به شبکه، ولتاژ و فرکانس ریزشبكة، توسط شبکه اصلی تنظیم می‌شود. توان کسری ریزشبكة نیز توسط شبکه اصلی تأمین شده و توان مازاد ریزشبكة، به شبکه اصلی قابل تزریق است. در حالت منفصل از شبکه، ضمن تنظیم ولتاژ و فرکانس توسط منابع ریزشبكة، توازن بین توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی ریزشبكة باید برقرار شود [۱]. استاندارد IEEE1547 الزامات اتصال منابع توزیع انرژی^۱ به یکدیگر و شبکه اصلی را بیان نموده است [۲]. همچنین وجوه تمایز ریزشبكة با شبکه سراسری، ملاحظاتی در طراحی سیستم کنترل ریزشبكة به شرح زیر در پی دارد:

- پخش بار دوطرفه
 - مسائل پایداری در فعل و انفعال سیستم‌های کنترل منابع ریزشبكة و حالت گذرا از متصل به منفصل از شبکه و بالعکس
 - عدم اعتبار مدل الکتریکی شبکه سراسری برای ریزشبكة
 - امکان بروز انحرافات فرکانس در حالت منفصل از شبکه به‌دلیل اینرسی پایین منابع موجود در ریزشبكة
 - عدم قطعیت بیشتر ریزشبكة به‌دلیل تعداد محدود بار و منبع و حضور پررنگ منابع تجدیدپذیر
 - اتصال اکثر منابع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به ریزشبكة سیستم کنترل ریزشبكة علاوه بر لحاظ موارد فوق، بهره‌برداری مطمئن و اقتصادی را نیز باید مدنظر داشته‌باشد [۱].
- مسئله اصلی مطرح در این مقاله، کنترل بهینه اقتصادی ریزشبكة با لحاظ تلفات و مشارکت در بازار پیش‌رو^۲، با توجه تعاریف و محدودیت‌های بازار است. تاکنون روش‌های مدیریت انرژی و کنترلی مختلفی برای ریزشبكة بیان شده‌است که عمدتاً بر پایه دو روش کنترل متمرکز و غیرمتمرکز بوده‌است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

مقاله [۳]، سه روش بهینه‌سازی بلادرنگ، کنترل سیستم مجرب و کنترل غیرمتمرکز را به‌عنوان راهبردهای کنترل ریزشبكة مطرح نموده‌است. در روش اول، استراتژی کنترل مدیریت انرژی، به‌شدت محاسباتی بوده و چنین بهینه‌سازی مطلق، به‌صورت بلادرنگ بسیار گران تمام می‌شود. شاید واقع‌بینانه‌تر باشد، مدیریت انرژی به‌گونه‌ای باشد که مجموعه‌ای محدود از گزینه‌های کنترلی با ارزیابی ساده قابل اعمال به حالت‌های گذشته، حال و آینده پیش‌بینی شده سیستم باشد. این روش کنترل، سیستم خبره^۲ نامیده می‌شود. در روش کنترل غیرمتمرکز، دستگاه‌ها به‌عنوان عوامل مستقل فعالیت نموده و می‌توانند از طریق ارتباط با سایر عوامل پیرامونی، تصمیم جامعی اتخاذ نمایند. تصمیم‌گیری در روش کنترل غیرمتمرکز، باید ساختار سلسله‌مراتبی^۴ داشته‌باشد. به‌طور معمول در این روش، بهره‌بردار بازار به‌عنوان یک واحد مستقل، پیشنهادهای تقاضا و تولید را از عوامل موجود جمع‌آوری نموده و با توجه به قوانین تدوین‌شده، نسبت به پخش توان بین عوامل تصمیم‌گیری می‌نماید.

کنترل سلسله‌مراتبی، شامل سه سطح کنترل اول، دوم و سوم است. به‌دلیل پاسخ زمانی متفاوت، این سطوح از یکدیگر مستقل می‌باشند. کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبكة و جلوگیری از ایجاد جریان چرخشی بین منابع، توسط کنترل‌کننده محلی هر منبع به نام کنترل سطح اول انجام می‌شود. این سطح کنترل دارای سریع‌ترین پاسخ زمانی و برخلاف سطوح کنترل دوم و سوم، فاقد ارتباط مخابراتی با سایر سیستم‌های کنترلی منابع دیگر است. در سطح کنترل دوم، انحرافات ولتاژ و فرکانس ناشی از عملکرد کنترل اولیه، جبران می‌شود. بهره‌برداری بهینه ریزشبكة به لحاظ اقتصادی و قابلیت اطمینان در دو حالت متصل و منفصل از شبکه و کنترل پخش بار با شبکه اصلی نیز وظیفه سطح کنترل سوم با کمترین سرعت پاسخ زمانی نسبت به سایر سطوح کنترل دیگر برشمرده می‌شود [۴، ۵].

سطح کنترل اول، براساس یکی از روش‌های تقسیم بار اکتیو و یا مشخصه دروپ استوار است. روش اول، به یک سیستم کنترل متمرکز و ارتباط مخابراتی بین عوامل نیازمند است [۶، ۷]. برخلاف آن در روش دوم، سیستم کنترل هر منبع مستقل بوده و نیازی به ارتباط مخابراتی با سایر منابع دیگر ندارد [۸، ۹]. مرجع [۴] برای این روش، هفت گزینه اصلاحی ارائه داده و مزایا و معایب هر یک را برشمرده‌است.

در سطح کنترل دوم، ولتاژ و فرکانس ریزشبكة با ولتاژ و فرکانس مرجع مقایسه می‌شود. سیگنال خطای ولتاژ و فرکانس پس از پردازش توسط کنترل‌کننده‌های فردی، به سطح کنترل اولیه منابع داده‌شده تا انحرافات ولتاژ و فرکانس جبران شوند [۱۰، ۱۱].

در [۱۲] با مقایسه دو مکانیزم کنترل بهینه اقتصادی بازار توسط الگوریتمی آموزشی، یکی پرداخت یکنواخت بر پایه تساوی هزینه (منفعت) حدی سوخت و دیگری پرداخت براساس پیشنهاد، سود

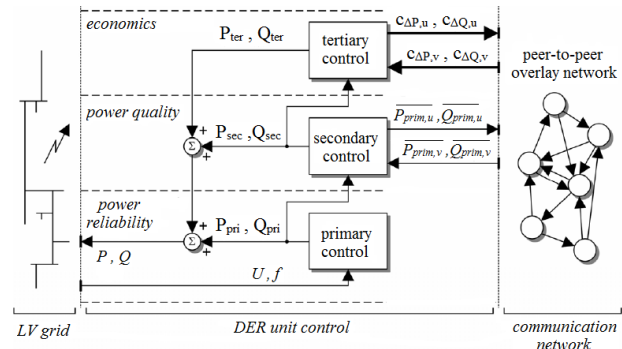
ظرف (منبعی) اختصاص می‌یابد که تابع شایستگی بالاتری داشته‌باشد. بدین ترتیب تمامی ذرات، جایگاه خود را در منابع پیدا خواهند نمود. تابع شایستگی مذکور با فرض اتصال تمامی منابع به یک گره و صرف‌نظر از مدل، آرایش و تلفات ریزشبهه طرح‌ریزی شده است. در [۱۵] ساختار سلسله‌مراتبی، نحوه پیاده‌سازی و ارتباط سیستم کنترل سطح اول (کنترل محلی هر منبع) با سیستم کنترل مرکزی سطح دوم (اصلاح‌کننده انحراف فرکانس ریزشبهه ناشی از خطای کنترل محلی) و سطح سوم (پخش پویای توان) بیان شده است. مقایسه الگوریتم سلسله‌مراتبی سنتی و پویا، حاکی از برتری روش پویا نسبت به روش سنتی است.

در [۱۶-۱۸] مدیریت انرژی در شبکه‌ای متشکل از چندین ریزشبهه با مالکین مختلف، قابل اتصال به شبکه توزیع، بر پایه سیستم چندعاملی پیاده‌سازی شده است. معماری چنین شبکه‌ای از سه بازار ریزشبهه، انجمن ریزشبهه‌ها و شبکه توزیع تشکیل شده است. هر چه تعداد و تنوع منابع ریزشبهه‌ها بیشتر باشد، کاهش هزینه ریزشبهه‌ها، جبران برخی عدم‌قطعیت‌ها، پیشامدها و افزایش ضریب اطمینان در ریزشبهه را در پی خواهد داشت؛ اما از طرفی اگر برای ریزشبهه‌ای امکان خرید انرژی با قیمت مناسب‌تر، از شبکه سراسری یا ریزشبهه‌های مجاور فراهم باشد، ریزشبهه موردنظر باید تولید خود را متوقف و نیاز خود را از خارج ریزشبهه تأمین کند. در [۱۷] توابع و محدودیت‌های غیرخطی مسئله بهینه‌سازی مدیریت انرژی، تبدیل به مجموعه‌ای از توابع خطی و متغیرهای باینری شده است. سپس مسئله بهینه‌سازی را به صورت برنامه خطی - باینری ترکیبی^۷ توسط ابزار YALMIP در محیط متلب حل نموده است. در [۱۸] نیز با ارائه سیستم کنترل غیرمتمرکز و استفاده از معماری چندعاملی، مدیریت انرژی در بازار پیش‌رو را به دو مرحله بازار روز و بازار ساعتی^۸ تقسیم نموده و ساختار سلسله‌مراتبی را گزینه مناسبی برای مدیریت ریزشبهه می‌داند.

در مسئله مدیریت انرژی ریزشبهه، علاوه بر بررسی و تعیین تابع هدف و انتخاب روش بهینه‌سازی آن، تعریف مدل بازار قابل پیاده‌سازی با توجه به سیاست‌گذاری بهره‌بردار شبکه توزیع ضروری به نظر می‌رسد. [۱۹] نامعادله $c^{bg} > c^{bl} \geq c^{sl} > c^{sg}$ را برای قیمت خرید (b) / فروش (s) از/به انرژی شبکه محلی (l) و شبکه توزیع (g) در نظر گرفته است. لحاظ قیمت خرید و فروش ریزشبهه در بین قیمت خرید و فروش شبکه اصلی، سبب تشویق به کاهش وابستگی شبکه‌های محلی به شبکه اصلی می‌گردد. نتایج حاصل از این سیاست‌گذاری، مبادله انرژی بین ریزشبهه‌ها و کاهش هزینه آن‌ها را در پی خواهد داشت. در [۲۰] با تعریف دو مدل مدیریت انرژی یکی توزیع بهینه استاتیکی (در لحظه) و دیگری توزیع بهینه دینامیکی (۲۴ ساعتی) توان، از الگوریتم بهبودیافته جستجوی هارمونی برای حل توزیع بهینه دینامیکی توان استفاده کرده است. در [۲۱] مدیریت انرژی ریزشبهه بر پایه روش بهینه‌سازی مقاوم با پایش پیشامدهای ریزشبهه مطرح

بیشتر پیشنهاددهنده را در اجرای مکانیزم پرداخت یکنواخت دانسته است.

بلوک دیاگرام شکل ۱ نمای کاملی از سطوح کنترل اول، دوم و سوم و ارتباط آن‌ها با یکدیگر، شبکه فشار ضعیف و شبکه مخابراتی نشان می‌دهد. برای برنامه‌ریزی بلادرنگ تولید در بازار روز پیش‌رو، از سیستم کنترل توزیع یافته و الگوریتم انتشار اطلاعات^۵ استفاده کرده است. در این الگوریتم، براساس تساوی هزینه حدى منابع، میزان توان بهینه آن‌ها، دوبه‌دو محاسبه‌شده تا تمامی منابع در شرایط بهینه اقتصادی بهره‌برداری شوند [۱۳].



شکل ۱: بلوک دیاگرام کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبهه [۱۳]

[۱۴] دو روش کنترل بهینه پخش اقتصادی توان، یکی براساس تئوری بازار و دیگری براساس تئوری بازی تکاملی مطرح و هر دو روش را در سیستم چندعاملی^۶ پیاده‌سازی نموده است. در سیستم چندعاملی هر یک از منابع و بارهای کنترل‌پذیر موجود در ریزشبهه (عامل واقعی) با کنترل‌کننده مرکزی (عامل مجازی) و کنترل‌کننده مرکزی با بهره‌بردار بازار جهت پخش بهینه توان بین منابع و بارها در ارتباط هستند.

روش اول برگرفته از معادله مشتق مرتبه اول تابع منفعت منابع تولیدی برابر با حداقل قیمت پیشنهادی است. این روش از دو راه تحلیلی و عددی قابل بررسی و حل است. در روش حل تحلیلی تئوری بازار، در برخی شرایط (تقاضای کم و ضریب هزینه بالای منبع)، امکان محاسبه توان بهینه اقتصادی منبع موردنظر، با حاصل منفی وجود دارد. در این صورت، اعمال محدودیت‌های بیشتر، از جمله برای توان تولیدی منابع ($p_i \geq 0$) ضروری بوده که حل مسئله بهینه‌سازی را به روش تحلیلی با مشکل مواجه خواهد نمود. روش حل عددی تئوری بازار که نوعی بهینه‌سازی محدود شده غیرخطی محسوب می‌شود، در ساختار سیستم چندعاملی پیاده‌سازی شده است؛ اما با توجه به این که حل مسئله بهینه‌سازی توسط برخی روش‌های عددی نظیر نیوتن و به صورت تکرار انجام می‌شود، در ریزشبهه‌هایی به‌ویژه با تعداد منابع زیاد، به لحاظ محاسباتی سنگین است.

در روش کنترل دوم (تئوری بازی تکاملی)، با استفاده از تابع منفعت، برای هر یک از منابع، مدل پویای پخش توان و تابع شایستگی (منطبق بر مدل پویای توزیع جمعیت) تعریف می‌شود. در این مدل با توجه به تعداد واحد (ذره) تقاضای ریزشبهه، هر ذره در هر لحظه به

تعریف می‌گردد. به‌طور طبیعی هر عضو از این جمعیت در هر لحظه جذب زیستگاهی می‌شود که شایستگی بیشتری داشته‌باشد. با نزدیک‌شدن جمعیت هر زیستگاه به حداکثر ظرفیت تعریف‌شده‌اش، شایستگی آن زیستگاه کاهش یافته تا به صفر برسد. در مدل پویا، فرآیند عضوگیری زیستگاه‌ها با فرض تثبیت جمعیت و زیستگاه‌ها، در یک بازه زمانی مشخص انجام می‌شود. زمانی که تمامی جمعیت، زیستگاه مناسب خود را یافته یا ظرفیت زیستگاه‌ها کامل شوند (هرکدام زودتر فرابرسند)، این فرآیند پایان می‌یابد [۱۴]. مدل پویای عضوگیری زیستگاه i برای جمعیت p_d عبارت‌اند از:

$$\frac{\dot{p}_{gi}(t)}{p_{gi}(t)} = f_{pgi}(p_{gi}(t)) - \bar{f}_{pg}(t) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $p_{gi}(t)$ مقدار لحظه‌ای جمعیت زیستگاه i تابع شایستگی زیستگاه i و \bar{f}_{pg} تابع شایستگی متوسط طبق تعریف زیر است:

$$\bar{f}_{pg}(t) = \frac{1}{p_d} \sum_{j=1}^n p_{gj}(t) f_{pgi}(p_{gj}(t)) \quad (2)$$

با تعریف فوق، محدودیت زیر نیز تضمین می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n p_{gi}(t) \leq p_d \quad (3)$$

مدل پویای (۱) زمانی به حالت پایدار می‌رسد که $\dot{p}_{gi}(t) = 0$ و لذا به‌ازای تمامی منابع از ۱ تا n می‌توان نوشت:

$$f_{pgi}(p_i^*) = \bar{f}_{pg}^* \quad (4)$$

که در این صورت p_i^* جمعیت بهینه واحد i خواهد شد [۱۴].

۲-۲- پیاده‌سازی مدل پویای توزیع جمعیت در پخش بار ریزشکه

طبق تعاریف بخش (۲-۱)، برای پیاده‌سازی مدل پویای توزیع جمعیت در پخش بار الکتریکی ریزشکه، p_d میزان بار موردتقاضا، n تعداد منابع قابل‌کنترل موجود در ریزشکه و p_{gi} مقدار توان تولیدی واحد i ام ریزشکه می‌تواند تلقی شود. تابع شایستگی نیز تابعی نزولی است زیرا با افزایش عضوگیری هر زیستگاه (منبع)، شایستگی آن کاهش می‌یابد. از طرفی شرط پخش بهینه اقتصادی توان بین منابع، تساوی هزینه حدى واحدهای تولیدی (صعودی) و یا تساوی منفعت حدى آن‌ها (نزولی) مطابق رابطه (۵) است؛ تابع منفعت (درآمد منهای هزینه) و تابع شایستگی هر منبع برگرفته از منفعت حدى آن به‌ترتیب طبق رابطه (۶) و (۷) تعریف می‌شود [۱۴، ۱۵].

$$\frac{du_1}{dp_{g1}} = \frac{du_2}{dp_{g2}} = \dots = \frac{du_n}{dp_{gn}} = m \quad (5)$$

گردیده است. استفاده از فناوری شبکه هوشمند، نیز امکان ارتباط بلادرنگ و دوسویه میان سیستم مدیریت انرژی و کاربران ریزشکه فراهم می‌کند. از طرفی در سیستم مدیریت انرژی در لحظه، عدم قطعیت‌ها به حداقل رسیده و حل مسئله بهینه‌سازی با دقت و سرعت بهتری صورت می‌پذیرد. [۲۲] نیز با در نظر گرفتن یک ریزشکه خانگی و نیاز هم‌زمان آن به گرما و الکتریسیته، تجمیع انرژی خورشیدی، بادی و پیل سوختی را ترکیبی بهینه و اقتصادی دانسته است. مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مدیریت انرژی ترکیب فوق، توسط هشت الگوریتم ابتکاری مختلف حل و روش الگوریتم جستجوی داخلی را گزینه مناسب به لحاظ تعداد تکرار و هزینه تمام‌شده، شناسایی نموده است.

مزیت حل مسئله بهینه‌سازی به روش پویای پخش توان، سادگی، دقت و سرعت عمل آن است. لذا با استفاده از این روش، نکات برجسته و نوآوری مقاله می‌تواند به شرح زیر باشد:

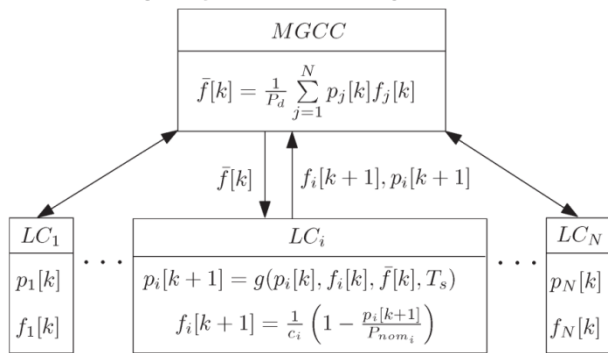
- اصلاح تابع شایستگی منابع کنترل‌پذیر با لحاظ میزان تأثیر هر یک از آن‌ها در میزان تلفات ریزشکه (تعریف ضریب جریمه در تابع شایستگی)
 - تعریف و تعیین حداقل قیمت پیشنهادی ریزشکه با استفاده از الگوریتم پخش توان پویا
 - ارائه الگوریتم مدیریت انرژی ریزشکه و نحوه مبادله توان با شبکه توزیع با توجه به قیمت خرید و فروش آن، با استفاده از پخش توان پویا در ساختار سیستم چندعاملی
- در ادامه در بخش دو، به تعریف دقیق مدل پویای جمعیت و نحوه پیاده‌سازی آن در پخش بار پویای ریزشکه پرداخته می‌شود. در بخش سوم، اثر تلفات ریزشکه در تابع شایستگی ارزیابی می‌شود. یکی از شاخص‌های مؤثر در تابع شایستگی اصلاح‌شده، مشتق تلفات ریزشکه نسبت به توان اکتیو تزریقی منابع (به نام اختصاری تلفات نسبی) است که در بخش چهارم به روش‌های مختلف محاسبه آن پرداخته می‌شود. بخش پنجم مدل ریزشکه در بازار پیش‌رو و بخش ششم با معرفی مدلی شعاعی از یک ریزشکه با خطوط مقاومتی و تعریف توابع هزینه سوخت منابع و هزینه آلاینده‌گی آن‌ها، فلوچارت مدیریت انرژی ریزشکه بیان می‌شود. در انتها در بخش شش، نتیجه‌گیری مباحث مطرح‌شده، ارائه خواهد گردید.

۲- پخش بار پویا

۲-۱- تعریف مدل پویا

مدل پویای جمعیت، برای حل مسائل مهم در شبکه‌های هوشمند از جمله پخش توان و پاسخ تقاضا، مطرح می‌شود. پخش بهینه توان، توسط مدل پویای جمعیت، جایگزینی پویا نامیده می‌شود. در این مدل فرض می‌شود، اعضای یک جمعیت محدود، n زیستگاه را جهت زیست خود قادر به انتخاب باشند. برای هر زیستگاه، براساس میزان ظرفیت و هزینه‌های نگهداری جمعیت در آن، یک تابع شایستگی

- تمامی منابع و بارها به یک گره متصل شده و مدل ریزش شبکه از جمله مدل خطوط لحاظ نشده و در نتیجه تأثیر تلفات ریزش شبکه در نظر گرفته نشده است.
- تأثیر هزینه مواد آلاینده واحدهای مختلف در تابع شایستگی مدل سازی نشده است.
- نحوه مبادله توان بین ریزش شبکه و شبکه اصلی در حضور تلفات بیان نشده است.
- مدل بازار در الگوریتم پخش پویای توان بررسی نشده است.
- مشابه توان اکتیو برای توان راکتیو، تابع شایستگی و نحوه مبادله توان راکتیو بین منابع و بارها و شبکه اصلی مطرح نشده است.



شکل ۲: طرح عامل پخش پویای توان در زمان تکرار کلام [۱۴]

۳- اثر تلفات ریزش شبکه بر تابع شایستگی

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، اثر تلفات شبکه بر روی تابع شایستگی لحاظ نگردیده است. برای این منظور مطابق معادله لاگرانژ می‌توان نوشت:

$$\ell = \sum_{i=1}^n u_i + m \left(\sum_{i=1}^n p_{gi} - p_d - p_{loss} \right) \quad (10)$$

با مشتق‌گیری از رابطه فوق نسبت به توان تولیدی واحد i ، منفعت حدی مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \ell}{\partial p_{gi}} = \frac{du_i}{dp_{gi}} + m \left(1 - \frac{\partial p_{loss}}{\partial p_{gi}} \right) = 0$$

$$m^{mdf} = \frac{1}{1 - \frac{\partial p_{loss}}{\partial p_{gi}}} \frac{du_i}{dp_{gi}} \quad (11)$$

شرط پخش توان بهینه اقتصادی، تساوی هزینه (منفعت) حدی واحدهای تولیدی است. با تعریف رابطه منفعت حدی به‌عنوان تابع شایستگی واحدهای تولید پراکنده، تابع شایستگی اصلاح شده با لحاظ میزان تأثیرگذاری تولید هر واحد بر تلفات ریزش شبکه، مطابق رابطه زیر خواهد شد:

که u_i تابع منفعت منبع i و m منفعت حدی و معادل حداقل قیمت پیشنهادی^۱ توان تولیدی ریزش شبکه است.

$$u_i(p_{gi}) = m_i p_{gi} - (c_i p_{gi}^2 + b_i p_{gi} + a_i) \quad (6)$$

$$f_i(p_{gi}) = \frac{du_i(p_{gi})}{dp_{gi}} = m_i - 2c_i p_{gi} - b_i \quad (7)$$

در رابطه (۶)، کمیت‌های b_i ، a_i و c_i ضرایب تابع هزینه سوخت منبع i است. با توجه به شایستگی صفر، به‌ازای تولید توان نامی توسط هر منبع به‌عنوان یک شرط مرزی برای معادله (۷)، منفعت حدی m در رابطه تابع شایستگی به شکل زیر قابل حذف است.

$$f_i(p_{gi}) = 0 \quad \forall p_{gi} = p_{gi \text{ nom}}$$

$$m_i - b_i = 2c_i p_{gi \text{ nom}}$$

$$f_i(p_{gi}) = 2c_i p_{gi \text{ nom}} \left(1 - \frac{p_{gi}}{p_{gi \text{ nom}}} \right)$$

$$c_{fi} \triangleq \frac{1}{2c_i p_{gi \text{ nom}}}$$

$$f_i(p_{gi}) = \frac{1}{c_{fi}} \left(1 - \frac{p_{gi}}{p_{gi \text{ nom}}} \right) \quad (8)$$

در روابط فوق $p_{gi \text{ nom}}$ مقدار توان نامی و c_{fi} ضریب هزینه منبع i است. با انتگرال‌گیری از رابطه (۸)، تابع منفعت، مطابق رابطه زیر بازتعریف می‌شود [۱۴].

$$u_i(p_{gi}) = \frac{1}{c_{fi}} \left(p_{gi} - \frac{0.5 p_{gi}^2}{p_{gi \text{ nom}}} \right) \quad (9)$$

به‌منظور پیاده‌سازی تئوری پخش پویای توان در سیستم چندعاملی، روابط این تئوری به‌صورت گسسته بیان شده است. شکل ۲ نوع و نحوه انتقال اطلاعات بین کنترل‌کننده محلی و کنترل‌کننده مرکزی را نشان می‌دهد. کنترل‌کننده مرکزی (سطح کنترل سوم) با توجه به میزان تقاضا، توان نامی و ضرایب هزینه منابع ریزش شبکه، شایستگی متوسط مرتبه k ام را محاسبه و به کنترل‌کننده‌های محلی (سطح کنترل اول) ارسال می‌کند. این سطح نیز شایستگی مرتبه $k+1$ ام را محاسبه و به کنترل‌کننده مرکزی ارسال می‌کند. این فرایند تا تخصیص کامل تقاضا به منابع ادامه می‌یابد [۱۴].

آنچه مسلم است، از جمله مزایای مدل پویای پخش توان برخلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی عددی، عدم نیاز به تکرار جهت نیل به جواب بهینه است که این خود زمان محاسبات را کاهش داده و گزینه مناسبی برای بازار لحظه‌ای پیش‌رو است؛ اما مدل پویای فوق کامل نبوده و براساس فرضیاتی به شرح زیر ارائه شده است.

$$\Delta q_m = \sum_{i=1}^{nb} \left(\frac{\partial q_m}{\partial p_i} \Delta p_i + \frac{\partial q_m}{\partial q_i} \Delta q_i \right) \quad (19)$$

با توجه به اینکه، هدف، محاسبه تغییرات تلفات شبکه نسبت به تغییرات توان اکتیو شینه‌ها است؛ از تغییرات توان راکتیو شینه (Δq_i) در روابط فوق صرف‌نظر می‌شود.

$$\frac{\partial p_m}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^{nb} \left(\frac{\partial |v_j|}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial |v_j|} + \frac{\partial \delta_j}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_j} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^{nb} \left(\frac{\partial |v_j|}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial |v_j|} + \frac{\partial \delta_j}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_j} \right) \quad (21)$$

در دو رابطه فوق، توان انتقالی P_m ، تابع اندازه و زاویه ولتاژ دو طرف خط m یعنی v_p و v_q است. هرچند با توجه به اینکه ریزشکده دارای خطوط مقاومتی است؛ تغییرات توان انتقالی نسبت به زاویه ولتاژ شینه‌های طرفین نیز ناچیز است. با این وجود می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_m}{\partial p_i} &= \frac{\partial |v_p|}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial |v_p|} + \frac{\partial |v_q|}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial |v_q|} \\ &+ \frac{\partial \delta_p}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_p} + \frac{\partial \delta_q}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_q} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial p_i} &= \frac{\partial |v_p|}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial |v_p|} + \frac{\partial |v_q|}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial |v_q|} \\ &+ \frac{\partial \delta_p}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_p} + \frac{\partial \delta_q}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_q} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial |v_p|} = 2g_m |v_p| - g_m |v_q| \cos(\delta_p - \delta_q) \quad (24)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial |v_q|} = -g_m |v_p| \cos(\delta_p - \delta_q) \quad (25)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_p} = g_m |v_p| |v_q| \sin(\delta_p - \delta_q) \quad (26)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_q} = -g_m |v_p| |v_q| \sin(\delta_p - \delta_q) \quad (27)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial |v_p|} = -g_m |v_q| \sin(\delta_p - \delta_q) \quad (28)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial |v_q|} = -g_m |v_p| \sin(\delta_p - \delta_q) \quad (29)$$

$$f_{mdfi}(p_{gi}) = \frac{1}{1 - \partial p_{loss} / \partial p_{gi}} \cdot \frac{1}{c_{fi}} \left(1 - \frac{p_{gi}}{p_{ginom}} \right) \quad (12)$$

تابع شایستگی اصلاح‌شده نیز به‌ازای توان نامی، صفر خواهد شد. همچنین ضریب جمله درجه دو تابع هزینه، از c_{fi} به $c_{fi} / (1 - \partial p_{loss} / \partial p_{gi})$ تغییر یافته است. هر منبعی که تلفات افزایشی/کاهشی بیشتری داشته‌باشد، ضریب هزینه اصلاح‌شده آن نیز بیشتر/کمتر خواهد شد. مشابه بخش گذشته، با انتگرال‌گیری از منفعت حدی (تابع شایستگی اصلاح‌شده)، تابع منفعت اصلاح‌شده واحدهای تولیدی با توجه به تلفات ریزشکده به‌دست می‌آید؛ اما قبل از آن بهتر است ضریب جریمه $1 / (1 - \partial p_{loss} / \partial p_{gi})$ در ریزشکده، بررسی و ارزیابی شود.

۴- محاسبه تلفات نسبی

روش‌های مختلفی برای محاسبه تلفات نسبی و تسریع در پخش توان الکتریکی به‌صورت بلادرنگ وجود دارد. از این جمله می‌توان روش‌های JBDF^{۱۶}، PTDF^{۱۵}، ZBD^{۱۴}، GGDF^{۱۳}، GSDF^{۱۲}، چهار روش اول که صرفاً مربوط به تغییرات توان اکتیو است؛ روش JBDF تغییرات توان تزریقی اکتیو و راکتیو در پخش بار توان راکتیو را نیز منعکس می‌نماید [۲۳].

در این مقاله، با استفاده از روش JBDF، مطابق روابط زیر، تلفات نسبی نیز محاسبه می‌شود:

$$P_m = g_m (|v_p|^2 - |v_p| |v_q| \cos(\delta_p - \delta_q)) \quad (13)$$

$$Q_m = -g_m |v_p| |v_q| \sin(\delta_p - \delta_q) \quad (14)$$

با توجه به فرض شبکه مقاومتی، g_m ، P_m و Q_m ، به‌ترتیب هدایت، توان اکتیو و راکتیو انتقالی خط m بین شینه p و q و ولتاژ و δ زاویه ولتاژ طرفین خط هستند. از دو رابطه فوق، تلفات ریزشکده و مشتق جزئی آن به شرح زیر حاصل می‌شود. nbr تعداد خطوط ریزشکده و nb تعداد شینه‌ها را نشان می‌دهد.

$$P_{loss} = \sum_{m=1}^{nbr} \frac{P_m^2 + Q_m^2}{g_m \cdot |v_p|^2} \quad (15)$$

$$\Delta p_{loss} = \sum_{m=1}^{nbr} \left(\frac{\partial p_{loss}}{\partial p_m} \Delta p_m + \frac{\partial p_{loss}}{\partial q_m} \Delta q_m \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial p_{loss}}{\partial p_m} = \frac{2P_m}{g_m \cdot |v_p|^2}, \quad \frac{\partial p_{loss}}{\partial q_m} = \frac{2Q_m}{g_m \cdot |v_p|^2} \quad (17)$$

$$\Delta p_m = \sum_{i=1}^{nb} \left(\frac{\partial p_m}{\partial p_i} \Delta p_i + \frac{\partial p_m}{\partial q_i} \Delta q_i \right) \quad (18)$$

۵- مدل ریزشبه در بازار پیش‌رو

همان‌طور که در مقدمه بیان شد و با توجه به ماهیت پخش پویای توان (تساوی منفعت حدی منابع)، مکانیزم پرداخت ریزشبه در این مقاله، روش پرداخت یکنواخت در نظر گرفته شده است. بازار پیش‌روی مفروض در این مقاله، بازار لحظه‌ای یا همان بازار زمان-حقیقی بوده و با دریافت اطلاعات موردنیاز، برای بازه زمانی بعدی (ده دقیقه) تصمیم‌گیری می‌کند. از جمله نامعادله‌های تعریف‌شده در بازار برق این است که همواره نرخ پیشنهاد خرید انرژی توسط بهره‌بردار بازار شبکه توزیع (m^{th}) از نرخ پیشنهاد فروش آن (m^{th}) همواره کوچک‌تر است. از طرفی منفعت حدی (حداقل قیمت پیشنهادی) ریزشبه (m^{th})، تابع میزان مشارکت و محدودیت‌های منابع و پخش بار ریزشبه است. حداکثر منفعت حدی ریزشبه ($m^{th,max}$) نیز با تولید اولین واحد توان توسط شایسته‌ترین منبع ریزشبه قابل محاسبه است. همچنین باید توجه داشت که تعرفه خرید و فروش انرژی توسط بهره‌بردار شبکه توزیع در طول شبانه‌روز متفاوت بوده، اما در بازه کوتاه‌مدت (ده دقیقه) بازار لحظه‌ای پیش‌رو این کمیت همانند سایر پارامترهای بازار ثابت فرض می‌شود. با توجه به روابط و داده‌های مطرح‌شده، فلوجارت شکل ۳ برای دستیابی به توان اکتیو و راکتیو بهینه هر واحد و براساس مکانیزم بازاری مشخص، پیشنهاد می‌شود. مطابق این فلوجارت، برای انتخاب منبع شایسته جهت تولید واحد i ام بار مصرفی، محاسبه تلفات نسبی در هر شینه به‌منظور محاسبه تابع شایستگی اصلاح‌شده هر شینه ضروری است؛ بنابراین انجام پخش بار به‌ازای توزیع هر واحد بار نیز لازم است. همان‌طور که برای پخش توان اکتیو منابع، مقایسه میزان شایستگی منابع، ملاک تخصیص توان تعریف شده است. برای پخش توان راکتیو، نیز شایستگی، کمینه‌سازی تلفات ریزشبه جهت تأمین توان راکتیو بار، در نظر گرفته شده است. لذا با لحاظ محدودیت تولید توان راکتیو منابع، توان راکتیو هر بار، باید توسط نزدیک‌ترین منبع تولیدی (نزدیک‌ترین مسیر مقاومتی) تأمین شود. با این فرض، میزان توان راکتیو تولیدی هر منبع تابع شرایط فوق بوده و ضریب قدرت منبع ثابت نیست. خروجی الگوریتم پخش پویای توان برای پیاده‌سازی مدل بازار، محاسبه حداقل منفعت حدی در دو حالت پخش توان داخلی ریزشبه ($m^{th,in}$) و پخش توان داخلی-بیرونی ریزشبه ($m^{th,in-out}$) است. هر چه تقاضا بیشتر باشد، منفعت حدی ریزشبه و حداقل قیمت پیشنهادی آن پایین‌تر خواهد بود؛ اما از طرفی قیمت خرید و فروش شبکه توزیع نیز در خروجی مدل بازار تأثیرگذار خواهد بود. در نهایت خروجی بازار لحظه‌ای پیش‌رو، تصمیم‌گیری به فروش یا خرید انرژی از شبکه توزیع و یا تولید به میزان مصرف داخلی خواهد بود.

$$\frac{\partial q_m}{\partial \delta_p} = -g_m |v_p| |v_q| \cos(\delta_p - \delta_q) \quad (30)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \delta_q} = g_m |v_p| |v_q| \cos(\delta_p - \delta_q) \quad (31)$$

کمیت‌های نامعلوم از روابط (۲۲) و (۲۳)، همانند $\partial |v_p| / \partial p_i$ ، $\partial |v_q| / \partial p_i$ ، $\partial \delta_p / \partial p_i$ و $\partial \delta_q / \partial p_i$ را نیز با استفاده از معکوس ماتریس ژاکوبین، مطابق رابطه زیر می‌توان به‌دست آورد:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (32)$$

در نهایت مشتق تلفات ریزشبه نسبت به توان اکتیو تزریقی شینه i مطابق رابطه (۳۳) خواهد شد [۲۳].

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_{loss}}{\Delta p_i} = & \sum_{m=1}^{nbr} \frac{2}{g_m |v_p|^2} [p_m (\frac{\partial |v_p|}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial |v_p|} + \frac{\partial |v_q|}{\partial p_i} \\ & \frac{\partial p_m}{\partial |v_q|} + \frac{\partial \delta_p}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_p} + \frac{\partial \delta_q}{\partial p_i} \frac{\partial p_m}{\partial \delta_q}) + q_m (\frac{\partial |v_p|}{\partial p_i} \\ & \frac{\partial q_m}{\partial |v_p|} + \frac{\partial |v_q|}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial |v_q|} + \frac{\partial \delta_p}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_p} + \frac{\partial \delta_q}{\partial p_i} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_q})] \end{aligned} \quad (33)$$

در برخی شبکه‌های شعاعی ممکن است روش معکوس ماتریس ژاکوبین با مشکل مواجه شود؛ زیرا در مینان ماتریس ژاکوبین در چنین شبکه‌هایی بالا بوده و در برخی مواقع منجر به واگرایی در معکوس ماتریس می‌شود. یکی دیگر از روش‌های رایج، افزایش جزئی در توان شینه‌های تولید و بررسی نتایج حاصل از آن است؛ بنابراین در صورت افزایش جزئی در توان شینه تولید و با فرض تثبیت بارهای موجود در ریزشبه، بخشی از این توان به‌صورت افزایش یا کاهش جزئی در تلفات ریزشبه و بخشی دیگر به‌صورت افزایش جزئی در توان شینه بی‌نهایت (مرجع)، مطابق معادله (۳۴) ظاهر می‌شود [۲۴]. در بخش بعدی نتایج هر دو روش، مقایسه خواهند شد.

$$\Delta p_{gi} = \Delta p_{loss} + \Delta p_{ref} \rightarrow \frac{\Delta p_{loss}}{\Delta p_{gi}} = 1 - \frac{\Delta p_{ref}}{\Delta p_{gi}} \quad (34)$$

با توجه به رابطه ۳۳، ملاحظه می‌شود، تلفات نسبی، تابع کمیت‌های متغیر در همسایگی شینه i است و وابستگی مستقیمی به توان تزریقی شینه i (p_{gi}) ندارد. لذا با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۲)، تابع منفعت اصلاح‌شده نیز مطابق رابطه زیر خواهد شد:

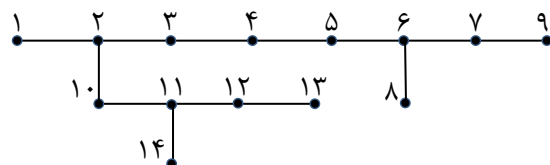
$$u_{mdf i}(p_{gi}) = \frac{1}{1 - \partial p_{loss} / \partial p_{gi}} \cdot \frac{1}{c_{fi}} \cdot (p_{gi} - \frac{0.5 p_{gi}^2}{p_{ginom}}) \quad (35)$$

۶- شبیه‌سازی

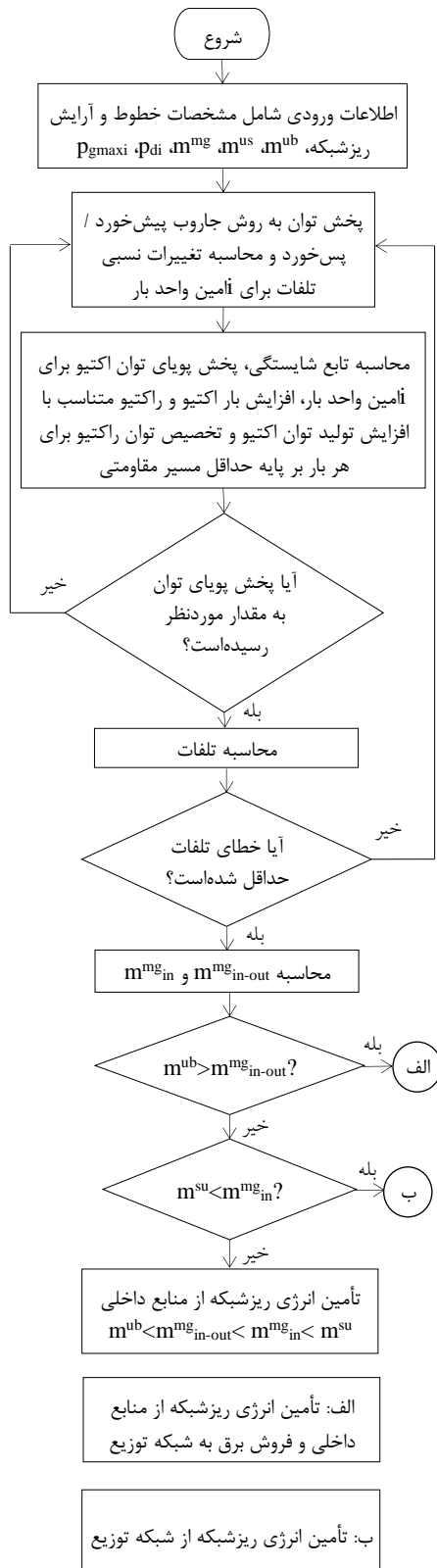
ریزشبکه مورد بررسی، یک شبکه شعاعی ۱۴ شینه با خطوط مقاومتی متصل به شینه بی‌نهایت، دارای پنج منبع تولید پراکنده (سه دیزل ژنراتور (DG) و دو میکروتوربین (Mt)) با توابع هزینه سوخت و آلایندگی متفاوت است. ریزشبکه فرضی در بستر یک شبکه توزیع شعاعی ایجاد شده است که اغلب، خطوط آن‌ها به دلیل مسافت کوتاه، مقاومتی در نظر گرفته می‌شوند. در جدول ۱، اطلاعات خطوط و نحوه آرایش ریزشبکه، در جدول ۲، ضرایب تابع درجه دوی هزینه سوخت منابع (a1 و b1 و c1) بر حسب \$/h و ضرایب تابع درجه دوی هزینه تولید آلایندگی NOx منابع (a2 و b2 و c2) را بر حسب gr/h، جدول ۳ اطلاعات بار ریزشبکه و شکل ۴ دیاگرام تک‌خطی آن را نشان می‌دهد [۲۵،۲۶]. به‌منظور مدل‌سازی منابع متغیر و غیرقابل کنترل (بادی و خورشیدی)، با توجه به اینکه فاقد تابع هزینه سوخت و منفعت حدی بوده و همواره باید حداکثر توان قابل تولید خود را به شبکه تزریق نمایند؛ می‌توان آن را به صورت بار با علامت منفی در شینه‌های نصب شده مدل نمود. این منابع فاقد تابع شایستگی بوده و صرفاً کاهش میزان بار مصرفی ریزشبکه و البته کاهش هزینه متغیر ریزشبکه را در پی داشته اما در مثال فعلی لحاظ نشده‌اند.

جدول ۱: اطلاعات خطوط ریزشبکه ۱۴ شینه [۲۵]

شماره خط	شینه مبدأ	شینه مقصد	مقاومت (pu)
۱	۱	۲	۰/۰۱۱۹
۲	۲	۳	۰/۰۱۱۹
۳	۳	۴	۰/۰۱۳۵
۴	۴	۵	۰/۰۱۶۷
۵	۵	۶	۰/۰۱۹۳۸
۶	۶	۷	۰/۰۲۲۴
۷	۶	۸	۰/۰۳۱۸۱
۸	۷	۹	۰/۰۳۴۲
۹	۲	۱۰	۰/۰۱۶۷
۱۰	۱۰	۱۱	۰/۰۱۹۳۸
۱۱	۱۱	۱۲	۰/۰۶۷۰۱
۱۲	۱۲	۱۳	۰/۰۹۴۹۸
۱۳	۱۱	۱۴	۰/۰۸۱۳۵



شکل ۴: دیاگرام تک‌خطی ریزشبکه



شکل ۳: فلوچارت مدیریت انرژی ریزشبکه

خواهد بود. لذا سهم توان هر منبع با احتساب ضریب جریمه، کمتر خواهد شد.

به‌عبارتی دیگر، برای تولید توانی مشخص، منفعت حدی در حالت اصلاح‌شده، بیشتر از حالت اولیه می‌شود. ضریب جریمه تلفات، اثر خود را به‌صورت افزایش منفعت حدی و درواقع افزایش حداقل قیمت پیشنهادی نشان می‌دهد. هر چه تلفات نسبی شینه‌ها بیشتر باشد، حداقل قیمت پیشنهادی (رقابتی) نیز بیشتر خواهد شد. مطابق شکل ۵، در نقطه کار فرضی با میزان شایستگی متوسط اصلاح‌شده ۱۰ دلار بر مگاوات‌ساعت، سهم منابع شینه‌های ۲، ۳، ۷ و ۱۳ به‌ترتیب ۲۲۴، ۸۹، ۱۱۶ و ۴۰ کیلووات و در مجموع معادل ۴۶۹ کیلووات است. درواقع حداقل قیمت پیشنهادی اصلاح‌شده ریزشبه در این حالت معادل ۱۰ دلار بر مگاوات‌ساعت است.

برای تولید همین میزان توان در شرایط عادی و بدون احتساب تلفات نسبی (مدل تک‌گروه)، منفعت حدی معادل ۹/۶۱ دلار بر مگاوات‌ساعت است. درواقع معادل ۰/۳۹ دلار بر مگاوات‌ساعت قیمت رقابتی ریزشبه ناشی از تلفات، افزایش یافته است. درصورتی‌که در بازار لحظه‌ای، نرخ خرید شبکه توزیع بیشتر از منفعت حدی باشد؛ فروش برق ریزشبه به شبکه توزیع منطقی خواهد بود. حتی توسط این نمودار، با توجه به قیمت خرید برق در بازار لحظه‌ای، میزان توان اقتصادی قابل فروش به شبکه توزیع را می‌توان به‌دست آورد. در شرایطی که منفعت حدی ریزشبه جهت تأمین توان داخلی ریزشبه (m^{mg}_{in}) از نرخ فروش شبکه توزیع بیشتر باشد، توقف تولید ریزشبه و خرید برق از شبکه توزیع، مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. مطابق شکل ۵، نمودار شایستگی عادی و اصلاح‌شده ژنراتور شینه ۷، بیشترین اختلاف را نسبت به هم داشته که دلیل آن وجود تلفات افزایشی زیاد آن، نسبت به سایر منابع است.

ژنراتور شینه ۲، نیز به‌دلیل نزدیکی به شبکه توزیع، کمترین ضریب جریمه را داشته، لذا اختلاف تابع شایستگی عادی و اصلاح‌شده آن، نسبت به سایر منابع کمتر است. مدت زمان دست‌یابی به پاسخ برای ریزشبه فعلی در حد چندین ثانیه است. لذا ضمن اینکه این روش برای ریزشبه‌هایی با تعداد شینه بیشتر کارایی دارد؛ بازه بازار لحظه‌ای پیش‌رو برای حداقل ده دقیقه آینده بوده و با توجه به سرعت پاسخ مطلوب این روش، فرصت کافی برای مدیریت انرژی بلادرنگ وجود خواهد داشت.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده تمامی انتخاب‌ها در راستای افزایش سرعت عمل در کنترل ریزشبه به‌ویژه در بازار پیش‌رو صورت پذیرد. حذف تکرار در مسئله بهینه‌سازی پخش توان با استفاده از راهبرد توزیع پویای جمعیت، استفاده از پخش بار پس‌خورد/پیش‌خورد در شبکه‌های شعاعی و استفاده از روش عددی به‌جای روش تحلیلی در محاسبه

جدول ۲: ضرایب هزینه‌های سوخت و آلاینده‌گی منابع ریزشبه [۲۵]

شماره شینه	۲	۳	۷	۱۲	۱۳
توان نامی منبع (kw)	۳۰۰ (DG)	۲۰۰ (DG)	۱۵۰ (Mt)	۸۰ (DG)	۵۰ (Mt)
a ₁	۱۰/۱۹	۲/۰۳۵	۰/۵۷۷	۱/۱۸۲۵	۰/۳۳۸
b ₁	۱۰۵/۱۸	۶۰/۲۸	۵۷/۷۸	۶۵/۳۴	۸۹/۱۵
c ₁	۶۲/۵۶	۴۴	۱۳۳/۱	۴۴	۵۴۷/۶
a ₂	۲۶/۵۵	۱۴/۴۳	۳/۰۳۶	۱۹/۳۸	۱/۰۳۵
b ₂	۱۶/۱۸	۶۴/۱۵	۵۷/۳۴	۱۷۶/۷	۶۰/۳۸
c ₂	۷/۰۵۱	۱۳۰/۴	۳۱۱/۶	۸۲۱/۷	۹۴۳/۲

در این تحقیق به‌منظور پخش بار شبکه‌های شعاعی، از روش جاروی پس‌خورد/پیش‌خورد استفاده شده است [۲۷، ۲۸]. مطابق بخش ۴، دو روش برای محاسبه تلفات نسبی مطرح شد که با ذکر یک مثال می‌توان به مقایسه هر دو روش پرداخت. درصورت پخش توان نامی منابع ریزشبه به مقدار ۷۸۰ کیلووات، سهم بارهای ریزشبه ۳۱۱/۴ کیلووات و مابقی صرف تلفات و تزریق به شبکه سراسری شده است. در چنین شرایطی تلفات نسبی با استفاده از روش JBDF [۰/۲ ۰/۱۷۶ ۰/۲۱۷ ۰/۱۲۳ ۰/۰۹۴ ۰/۰۹۴] و در روش عددی جزئی [۰/۱۹۶ ۰/۱۷۱ ۰/۲۱۰ ۰/۱۱۹ ۰/۰۹۱ ۰/۰۹۴] به‌دست‌آمده که حاکی از اختلاف ناچیز این دو روش است. لذا به لحاظ محدودیت‌های ذکرشده روش ژاکوپین در شبکه شعاعی، از روش عددی نیز بهره برد.

جدول ۳: اطلاعات بار ریزشبه ۱۴ شینه [۲۲]

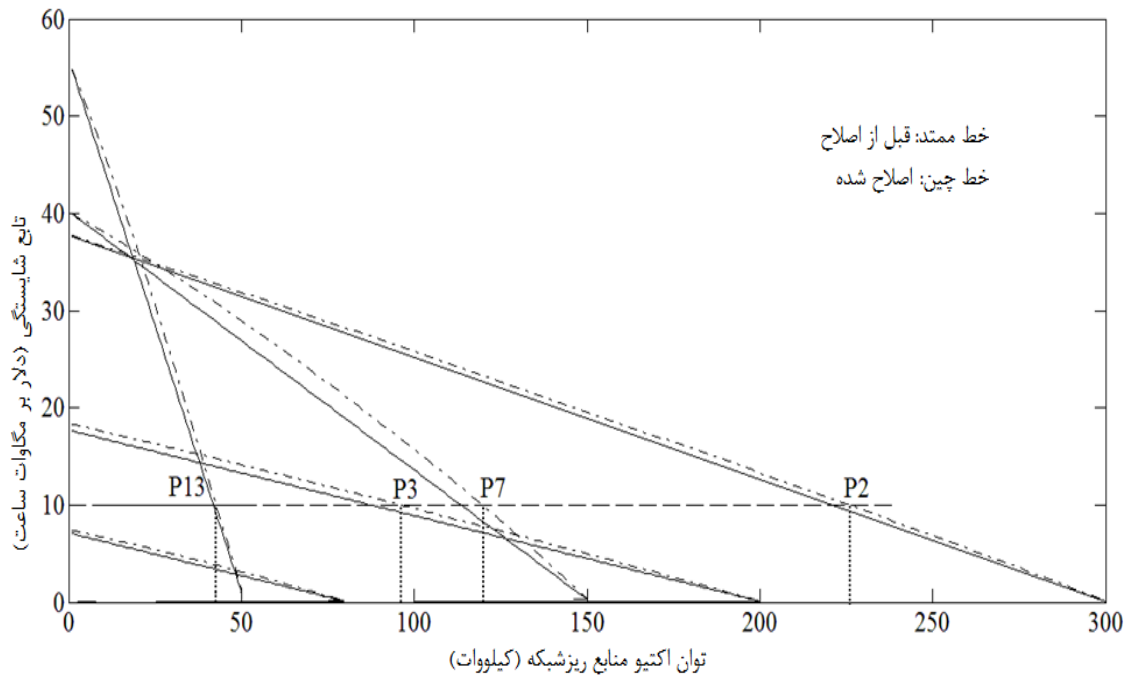
شماره شینه	توان اکتیو مصرفی (KW)	توان راکتیو مصرفی (KVA _r)
۱	۰	۰
۲	۲۰	۶/۵
۳	۸۵	۲۸
۴	۴۰	۱۳
۵	۲۰	۶/۵
۶	۲۰	۶/۵
۷	۷/۶	۱/۶
۸	۱۰	۳
۹	۶/۱	۱/۶
۱۰	۱۱/۲	۷/۵
۱۱	۱۶	۹
۱۲	۳۲	۱۶
۱۳	۳۰	۱۵
۱۴	۱۳/۵	۶/۱

شکل ۵، نمودار تابع شایستگی منابع ریزشبه، به‌منظور تأمین توان مصرفی داخل ریزشبه و فروش توان مازاد به شبکه توزیع (داخلی - بیرونی) را نشان می‌دهد. نمودار خط‌ممتد، تابع شایستگی بدون ضریب جریمه تلفات و نمودار خط‌چین، تابع شایستگی اصلاح‌شده و با احتساب ضریب جریمه تلفات را نشان می‌دهد. منفعت حدی اصلاح‌شده (m^{mdf}) نیز درصورتی‌که تلفات ریزشبه از نوع افزایشی باشد، مطابق رابطه (۱۱)، از منفعت حدی عادی (m) بزرگ‌تر

ریزشبکه افزایش یافته، یا به عبارتی، قیمت رقابتی افزایش یافته و امکان حضور ریزشبکه در بازار را کاهش می‌دهد. از جمله فعالیت قابل پژوهش جدید در این راستا، می‌توان به تعریف تابع شایستگی برای توان راکتیو همانند توان اکتیو اشاره کرد تا ریزشبکه علاوه بر مشارکت در بازار توان اکتیو، با تزریق بهینه اقتصادی توان راکتیو، سهم مؤثری نیز در بازار خدمات جانبی داشته باشد. همچنین این مدل را می‌توان برای چندین ریزشبکه مجاور یکدیگر نیز بررسی و پیاده‌سازی نمود.

تلفات نسبی، از جمله این اقدام‌ها محسوب می‌شود. همچنین اصلاح تابع شایستگی از مدل تک‌گره به گسترده با ورود ضریب جریمه در تابع شایستگی، از جمله دیگر کارهای انجام شده است.

در نگاه اول شاید به نظر برسد، سهم تلفات در ریزشبکه ناچیز است؛ اما در ریزشبکه‌هایی که در بستر شبکه توزیع موجود بنا می‌شوند، در کنار تابع هزینه منبع، سهم منبع از میزان هزینه تلفات ایجاد شده در ریزشبکه نیز حائز اهمیت است. در این مقاله به‌نوعی تلفات ریزشبکه، اثر خود را در حداقل قیمت پیشنهادی (رقابتی) ریزشبکه نشان داده است. هر چه اثر تلفات پررنگ‌تر باشد، هزینه



شکل ۵: نمودار شایستگی منابع در پخش توان داخلی - بیرونی

مراجع

- [7] S. Sun, L. K. Wong, Y. S. Lee, and D. Xu, "Design and analysis of an optimal controller for parallel multi-inverter systems," *IEEE Trans. Circuit Syst. II*, vol. 53, no. 1, pp. 56–61, 2006.
- [8] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, L. G. D. Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [9] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla and L. G. D. Vicuna, "Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 726–736, 2009.
- [10] Q. C. Zhong, "Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 936–945, 2013.
- [11] B. Marinescu and H. Bourles, "Robust predictive control for the flexible coordinated secondary voltage control of large scale power system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1262–1268, 1999.
- [12] B. Jie, T. Tsuji, K. Uchida, "An analysis of market mechanism and bidding strategy for power balancing market mixed by conventional and renewable energy,"
- [1] D. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, and ..., "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE Std. 1547*, 2003.
- [3] R. Firestone and C. Marnay, "Energy Manager Design for Microgrids," *Tech. Rep. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS)*, vol. 1, no. 2, pp. 15–22, 2005.
- [4] A. Bidram and A. Davoudi, "Hierarchical structure of microgrids control system," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, 2012.
- [5] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, "Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1883–1891, 2010.
- [6] X. Sun, Y. S. Lee, and D. Xu, "Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-converter system with instantaneous average-current sharing method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 844–856, 2003.

- [۲۱] س. ک. پهنه کلائی، م. رحیمیان، «مدیریت انرژی نیروگاه مجازی بر پایه بهینه‌سازی مقاوم با پایش پیشامدهای ریزشکبه: مطالعه موردی خروج تکی خط». مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحه ۲۴۹-۲۶۱، ۱۳۹۶.
- [22] M. Rouholamini and M. Mohammadian, "Heuristic-based power management of a grid-connected hybrid energy system combined with hydrogen storage," *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 354-356, 2016.
- [23] W. T. Huang, and K. C. Yao, "New network sensitivity-based approach for real-time complex power flow calculation," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 6, no. 2, pp. 109-120, 2012.
- [24] B. Wollenberg and A. Wood, "Power Generation, Operation and Control," 2nd ed., New York, Wiley, 1996.
- [25] A. K. Basu, A. Bhattacharya, and ... "Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro-grid," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 27, no. 1, pp. 30-38, 2012.
- [26] A. K. Basu, A. Bhattacharya, and ... "Impact of strategic deployment of CHP-based DERs on microgrid reliability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1697-1705, 2010.
- [27] G. W. Chang, S. Y. Chu, and H. L. Wang, "An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 22, no. 2, pp. 882-884, 2007.
- [28] A. D. Rana, J. B. Darji, and M. Pandya, "Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution System," *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 2, no. 1, pp. 398-400, 2014.
- European Energy Market International Conference., pp. 1-6, 2017.
- [13] K. D. Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, "Control of microgrids," in *Proc. IEEE Power Engineer. Soc. General Meet.*, no. 1, pp. 1-7, 2007.
- [14] A. Pantoja and N. Quijano, "A population dynamics approach for the dispatch of distributed generators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4559-4567, 2011.
- [15] E. M. Nava, C. A. Macana and N. Quijano, "Dynamic Population Games for Optimal Dispatch on Hierarchical Microgrid Control," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 44, no. 3, pp. 306-317, 2014.
- [16] J. A. Navarro, A. A. Bayod, J. M. Yusta-Loyo, J. L. Bernal-Agustín, R. Dufo-López, S. Artal-Sevil and A. Coronado-Mendoza, "Local electrical market based on a Multi-agent system," *IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 239-244, 2017.
- [17] P. Tian, X. Xiao, K. Wang and R. Ding, "A hierarchical energy management system based on hierarchical optimization for microgrid community economic operation," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2230-2241, 2016.
- [18] E. Amicarelli, Q. T. Tran and S. Bacha, "Multi-agent system for day-ahead energy management of microgrid," *IEEE 18th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2016
- [19] M. R. Sandgani and S. Sirouspour, "Energy management in a network of grid-connected microgrids/nanogrids using compromise programming," *IEEE Trans. on Smart Grid*, pp. 1-12, 2016.
- [۲۰] م. نوشیار، «توزیع اقتصادی دینامیکی توان در سیستم قدرت با الگوریتم توسعه‌یافته جستجوی هارمونی». مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۶۵-۱۲۷۶، ۱۳۹۵.

زیرنویس‌ها

¹ Distributed Energy Resources (DER)

² Day-ahead market

³ Expert system

⁴ Hierarchical

⁵ Gossiping

⁶ Multi-agent system

⁷ Mix-Integer Linear Programming

⁸ Hour-ahead market

⁹ Replicator Dynamic (RD)

¹⁰ Bid price

¹¹ Penalty factor

¹² Generation Shift Distribution Factor (GSDF)

¹³ Generalized Generation Shift Distribution Factor (GGDF)

¹⁴ Z-bus Distribution Factor (ZDF)

¹⁵ Power Transformer Distribution Factor (PTDF)

¹⁶ Jacobian Based Distribution Factor (JBDF)