

بهبود پایداری ولتاژ در ریزشبهه با استفاده از بهینه‌سازی کنترل محلی

وحید بهرامی فروتن، محمدحسن مرادی و محمد عابدینی

به علت دسترسی فراوان و بدون هزینه، بسیار مورد توجه می‌باشد. میزان انرژی تولیدی از باد به سرعت توربین، نوع رتور و چگالی هوا وابسته است. در عمل، یک توربین بادی، تولید توان از باد را در سرعت ۹ متر بر ثانیه شروع می‌کند و در سرعت ۱۳ متر بر ثانیه به توان نامی می‌رسد و در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه تولید توان متوقف می‌شود [۲]. از این رو در این مقاله نیز به منظور کاهش هزینه تولید توان، در کنار واحدهای بر پایه سوخت گازی از منابع بادی استفاده شده است.

ریزشبکه‌ها در دو حالت مختلف کار می‌کنند: حالت متصل که ریزشبهه از طریق نقطه اتصال مشترک^۳ (PCC) به شبکه اصلی متصل است و حالت جزیره‌ای که ریزشبهه، مستقل از شبکه کار می‌کند. در میان عوامل مختلف تأثیرگذار بر رفتار ریزشبهه‌ها، تنظیم عملکرد بهینه و همچنین ساینبدی و مکان‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده از جذابیت‌های خاص پژوهشی در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع می‌باشد [۳] تا [۸]. برای پیداکردن عملکرد بهینه ریزشبهه جزیره‌ای، استفاده از کنترل‌کننده مرکزی ضروری است. در [۹] تکنیک‌های برنامه‌نویسی بهینه برای ریزشبهه‌های جزیره‌ای با تمرکز بر مزایای اقتصادی بحث شده است. مراجع [۱۰] و [۱۱] منابع تولید پراکنده را بر مبنای کنترل اکتیو و همچنین یک بار گرمایی را در ریزشبهه مدل‌سازی کرده‌اند و از کنترل‌کننده مرکزی ریزشبهه^۴ (MGCC) برای بهینه‌سازی قیمت کلی سوخت ریزشبهه جزیره‌ای استفاده کرده‌اند. مرجع [۱۲] انتقال توان بین منابع تولید پراکنده را با استفاده از یک الگوریتم تکاملی مورد بررسی قرار داده است. در [۱۳] و [۱۴] روش‌های مختلف برای کاهش قیمت سوخت ریزشبهه‌های جزیره‌ای پیشنهاد گردیده است. در [۱۵] و [۱۶] یک روش برنامه‌نویسی تحلیلی برای پخش توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده با استفاده از کنترل اکتیو منابع تولید پراکنده و با در نظر گرفتن نامعینی نیروگاه‌های بادی کوچک ارائه شده است. بعضی مراجع، طراحی ساختار ریزشبهه را مورد توجه قرار داده و روش‌هایی را برای ایجاد ساختار بهینه تولید پراکنده ارائه نموده‌اند [۱۷] تا [۱۹].

در [۲۰] عملکرد منابع تولید پراکنده با توجه به قیود محیطی بهینه شده است. در [۲۱] و [۲۲] با در نظر گرفتن عدم قطعیت مزارع بادی، برنامه‌ریزی تصادفی به منظور مدیریت توان راکتیو ریزشبهه، پیشنهاد گردیده است و تابع چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی تلفات، بیشینه‌سازی ذخیره توان راکتیو و بیشینه‌سازی حاشیه امنیت ولتاژ با استفاده از یک برنامه‌نویسی چندهدفه چهارمرحله‌ای بهینه شده است اما هیچ گونه طراحی به منظور کاهش هزینه سوخت و بهبود مشخصه ولتاژ انجام نگرفته است. ضمن این که روش الگوریتم پرندگان برای بهینه‌سازی و یک روش ساده‌سازی برای قابلیت بارپذیری ریزشبهه با استفاده از پخش بار ارائه گردیده است. در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی دوگانه مبتنی بر الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک HS-GA پیشنهاد شده که در واقع روشی جامع‌تر از منابع ذکر شده می‌باشد. نتایج حاصل از

چکیده: چالش‌های پایداری در ریزشبهه‌ها عمدتاً از اینرسی پایین منابع تولید پراکنده در سیستم ایجاد می‌شوند. در این مقاله، موضوع بهبود پایداری ولتاژ به منظور بهبود عملکرد ریزشبهه مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی و بهبود پایداری ولتاژ از شاخص پایداری ولتاژ در سیستم‌های متشکل از انواع مختلف منابع پراکنده (DG) استفاده شده و یک روش جدید بهینه‌سازی دوگانه برای پیداکردن عملکرد بهینه در ریزشبهه جزیره‌ای و بهبود شاخص پایداری ولتاژ ارائه شده است. بهینه‌سازی عملکرد توسط پیداکردن پارامترهای بهینه مشخصه اکتیو منابع پراکنده و جایابی واحدهای بادی با هدف کاهش هزینه انرژی تولیدی انجام می‌شود. بهینه‌سازی به عنوان یک مسئله چندهدفه تعریف می‌شود و توابع هدف برای کمینه‌سازی مصرف سوخت منابع پراکنده و بهبود مشخصه ولتاژ و پایداری ریزشبهه در قیود کاری و حفاظتی به کار می‌روند. یک الگوریتم دوگانه با نام HS-GA برای حل مسئله بهینه‌سازی طراحی شده است. یک رابطه جدید پخش بار نیز برای اجرای الگوریتم پیشنهادی ارائه گردیده و فرکانس حالت ماندگار سیستم، فرکانس مرجع، ضرایب اکتیو و ولتاژ مرجع واحد تولید پراکنده مبتنی بر کنترل‌کننده اکتیو به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج راهکار پیشنهادی با دیگر روش‌ها برای ریزشبهه‌های ۳۳ و ۶۹ باسه با استفاده از نرم‌افزار Matlab مقایسه گردیده است. عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با حالتی که در آن پارامترهای واحد تولید پراکنده بدون اجرای فرایند بهینه‌سازی تعیین شده‌اند دارای عملکرد مطلوب‌تری می‌باشد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که بهینه‌سازی پارامترهای مشخصه اکتیو، عملکرد ریزشبهه را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه: الگوریتم جستجوی هارمونی، توابع چندهدفه، پخش بار، تصمیم‌گیری فازی.

۱- مقدمه

برخی از انواع منابع تولید پراکنده^۱ (DG) مانند دیزل ژنراتورها، پیل‌های سوختی و میکروتوربین‌ها، منابعی کنترل‌پذیر و بعضی دیگر مانند توربین‌های بادی و سیستم‌های خورشیدی، منابعی کنترل‌ناپذیر می‌باشند. منابع تولید پراکنده در کنار کنترل‌کننده‌ها، بارها و سیستم‌های مخابراتی، یک سیستم فشارضعیف کوچک را به نام ریزشبهه^۲ می‌سازند که بخش مهمی از توسعه شبکه‌های توزیع امروزی محسوب می‌گردند [۱].

در یک ریزشبهه انواع مختلفی از واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های نو می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در آن میان، انرژی باد

این مقاله در تاریخ ۲ مرداد ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۴ دی ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

وحید بهرامی فروتن، گروه مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، (email: v2bahrami@yahoo.com).

محمدحسن مرادی، گروه مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، (email: mhmoradi@basu.ac.ir).

محمد عابدینی، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، (email: m_abedini_dr@yahoo.com).

3. Point of Common Coupling

4. Micro-Grid Central Control

1. Distributed Generation

2. Microgrid

تقسیم می‌شود. با استفاده از روش غیر متمرکز می‌توان تنظیم ولتاژ مناسبی را در نقطه اتصال مشترک (PCC) ایجاد کرد هر چند که این روش دارای معایبی مانند افت ولتاژ در بعضی از شین‌ها، نداشتن کمینه‌ساز قیمت تولید و تقسیم‌کننده توان راکتیو بین منابع پراکنده بر مبنای مشخصه‌های منبع می‌باشد [۲۶]. برای غلبه بر این معایب، تنظیم پارامترهای منابع تولید پراکنده از اهمیت بالایی برخوردار است. در عمل، کنترل‌کننده مرکزی ریزشکه ممکن است چنین تنظیم پارامترهایی را انجام دهد. در این مقاله، ترکیبی از کنترل‌کننده مرکزی ریزشکه و یک روش کنترل غیر متمرکز برای حل مسئله پخش توان بهینه در ریزشکه‌ها طراحی و ارائه گردیده است. کنترل‌کننده مرکزی برای ایجاد پارامترهای اکتی بهینه منابع تولید پراکنده و کنترل‌کننده غیر متمرکز برای کار کردن با پارامترهای اکتی بهینه‌شده به کار گرفته شده‌اند. ویژگی ترکیب این دو کنترل‌کننده، قابلیت اطمینان بالا و قیمت پایین روش‌های غیر متمرکز با کنترل اکتی به علت کاهش پهنای باند و مقاوم‌سازی سیستم کنترل در مقابل هر شکست خط ارتباطی در مقایسه با روش‌های متعارف است.

۳- فرمول‌بندی مسئله

مسئله در اینجا پیدا کردن مشخصه‌های منابع پراکنده برای بهینه‌سازی سه تابع هدف می‌باشد که از توابع f_1 کاهش قیمت سوخت واحدهای تولید پراکنده، f_2 بهبود پایداری ولتاژ و f_3 کاهش تغییرات کلی ولتاژ (TVV) تشکیل شده است. این سه تابع هدف به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطابق زیر فرمول‌بندی می‌شوند

$$\min \{f_1(i, k), f_2(i, k), f_3(i, k)\} \quad (1)$$

که i تعداد شین‌ها و k مشخصه‌های استاتیک شامل مراجع ولتاژ، فرکانس و بهره‌های اکتی ساکن می‌باشند

$$k = \{\omega_i^*, |\omega_i^*|, s_{pi}, s_{qi}\}, \quad i \in N_{dr} \quad (2)$$

۳-۱ قیمت سوخت واحدهای تولید پراکنده

قیمت مصرف سوخت می‌تواند به صورت زیر بیان می‌شود

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} \times C_i(P_{DG_i}) \quad (3)$$

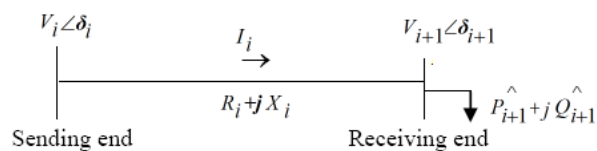
که $C_i(P_{DG_i})$ مصرف سوخت واحد تولید پراکنده i می‌باشد. قابل ذکر است که واحدهای تولید پراکنده بر مبنای توربین‌های گازی و ژنراتورهای سنکرون قرار دارند.

۳-۲ شاخص پایداری ولتاژ

شاخص پایداری ولتاژ (VSI) [۲۷] مطابق (۴) بیان می‌گردد [۲۷]

$$VSI(i+1) = V_i^* - \epsilon [P_{i+1} X_i - Q_{i+1} R_i] \quad (4)$$

که برای محاسبه پایداری یک خط ریزشکه مشابه شکل ۱ به کار می‌رود. برای عملکرد پایدار ریزشکه، شاخص پایداری باید در همه شین‌های ریزشکه، مثبت باشد. واحدهای تولید پراکنده با پایین‌ترین میزان شاخص، محتمل‌ترین شین برای ناپایداری می‌باشند. بنابراین برای نصب و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده، باس‌های با کمترین شاخص پایداری ولتاژ می‌تواند یکی از معیارهای انتخاب باشد تا مانع از ناپایداری شبکه در



شکل ۱: نمودار تک‌خطی یک خط از ریزشکه.

شبیه‌سازی، برتری روش پیشنهادی را نسبت به روش‌های قبلی اثبات می‌کند. مروری بر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم مشارکت زیاد تمام کارهای مذکور در زمینه بهینه‌سازی شبکه قدرت، مطالعات اندکی در زمینه عملکرد و موقعیت منابع پراکنده به طور هم‌زمان انجام شده است. این مقاله یک راهکار جدید را برای پیدا کردن هم‌زمان موقعیت و عملکرد ریزشکه به طور هم‌زمان ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی عملکرد با پیدا کردن پارامترهای بهینه بهره مشخصه اکتی منابع پراکنده انجام می‌شود. مسئله بهینه‌سازی بر حسب مسئله چندهدفه به منظور کمینه‌سازی مصرف سوخت منابع تولید پراکنده برای بهبود پایداری و مشخصه ولتاژ ریزشکه با قیود عملیاتی و حفاظتی فرموله می‌شود. الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) برای بهینه‌سازی الگوریتم در این کار طراحی شده است. اگرچه جستجوی هارمونی به عنوان یک راهکار بهینه‌سازی مشهور، مطرح می‌باشد اما این روش، عیوبی مانند سرعت پایین همگرایی و گیرافتادن در جواب‌های بهینه محلی را دارد. برای غلبه بر این نقاط ضعف آن را با الگوریتم ژنتیک (GA) ترکیب کرده تا یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید ایجاد گردد. یک فرمولاسیون پخش بار جدید برای اجرای الگوریتم پیشنهادی ارائه شده که فرکانس حالت ماندگار سیستم، فرکانس مرجع، ولتاژ مرجع و ضرایب اکتی منابع پراکنده بر مبنای کنترل‌کننده اکتی، متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند. در راهکار پیشنهادی مقاله، ابتدا جبهه پارتوی نتایج غیر مسلط فراهم می‌شود و سپس بهترین جواب از نتایج غیر مسلط با استفاده از روش فازی به دست می‌آید.

ساختار مقاله مطابق زیر است: ابتدا پیش‌زمینه مقاله آورده شده است، سپس فرمولاسیون مسئله، راه حل مربوط و در نهایت نتایج عددی و بحث و بررسی ارائه گردیده است.

۲- پیش‌زمینه

دو حالت عملکرد متصل به شبکه و مستقل از شبکه می‌توانند برای ریزشکه‌ها در نظر گرفته شوند. در حالت متصل، ولتاژ و فرکانس ریزشکه توسط شبکه کنترل می‌شود و ریزشکه تبادل توان الکتریکی با شبکه را کنترل می‌کند [۲۳]. در حالت مستقل از شبکه که هیچ گونه ارتباطی بین ریزشکه و شبکه اصلی وجود ندارد، ریزشکه مسئول تنظیم ولتاژ و فرکانس می‌باشد. توان تولیدشده توسط ریزشکه نیز باید بار محلی را جبران نماید. یک روش کنترلی مناسب به منظور مدیریت تغذیه بار ریزشکه و تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده نیاز است.

دو روش کنترلی متمرکز و غیر متمرکز در ریزشکه‌ها به کار گرفته می‌شود. روش‌های کنترل متمرکز به ظرفیت بالای انتقال داده و اتصال مخابراتی مطمئن برای تبادل سیگنال‌های تقسیم توان بین منابع پراکنده نیاز دارند [۲۴] و [۲۵] هر چند که چنین روش‌هایی به علت استفاده از پهنای باند بالا و نیاز به لینک‌های ارتباطی مطمئن، گران‌قیمت می‌باشند. روش کنترل متمرکز برای ریزشکه‌های مقیاس کوچک که واحدهای تولید پراکنده نزدیک به یکدیگر دارند مناسب است. با استفاده از روش غیر متمرکز و مشخصه‌های کنترل‌کننده اکتی و اندازه‌گیری محلی (تغییرات ولتاژ و فرکانس)، تقاضای بار می‌تواند بین منابع تولید پراکنده،

1. Total Voltage Variation
2. Voltage Stability Index

(۲) قید حرارتی: قید حرارتی می‌تواند با محدود کردن شارش جریان در خطوط شبکه به صورت زیر بیان شود

$$I_i \leq I_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_{Br} \quad (10)$$

(۳) قید تولید توان منابع پراکنده

برای یک ریزشبهه جزیره‌ای با یک کنترل‌کننده افتی، قید تولید توان می‌تواند با محدود کردن توان‌های اکتیو، راکتیو و نامی به ترتیب مطابق زیر نوشته شود

$$P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (11)$$

$$Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad (12)$$

$$P_{gi}^r + Q_{gi}^r \leq S_{gi}^{\max} \quad (13)$$

که در آن P_{gi} و Q_{gi} از (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند. در مواردی که توان تولیدی اکتیو و راکتیو به مقادیر بیشینه خود برسند مقادیر، روی P_{gi}^{\max} و Q_{gi}^{\max} تنظیم شده و کنترل‌کننده افتی به کنترل‌کننده شین PQ تبدیل می‌شود.

۴- راه حل پیشنهادی

در این مقاله، عملکرد بهینه واحدهای تولید پراکنده در ریزشبهه جزیره‌ای به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شده است. برای حل این مسئله چندهدفه، یک روش جدید پیشنهاد گردیده است که دارای سه جزء می‌باشد:

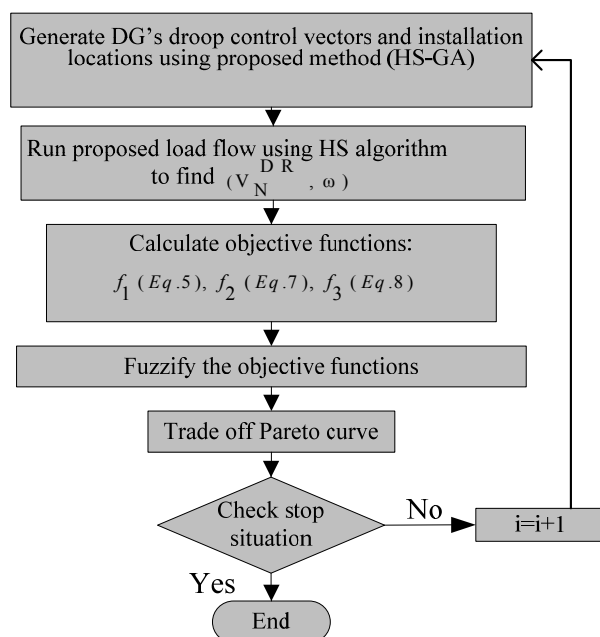
- یک الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای ترکیب HS و GA پیشنهاد شده است.
 - یک الگوریتم پخش بار برای ریزشبهه جزیره‌ای بر مبنای کنترل افتی، PQ ارائه شده است.
 - یک روش فازی برای پیدا کردن بهترین HM و بهترین جواب نهایی به کار رفته است. توجه شود که HM یک حافظه است که شامل مجموعه پارامترهای تصمیم‌گیری است (بردار پارامترهای کنترلی و محل نصب هر واحد).
- مراحل روش پیشنهادی می‌تواند مطابق شکل ۲ خلاصه شود.

۴-۱ روش بهینه‌سازی پیشنهادی

در این مقاله برای بهینه‌سازی، روش جستجوی هارمونیک (HS) تطبیق داده شده است. اگرچه HS یکی از روش‌های مشهور بهینه‌سازی است ولی دارای چند ایراد مانند سرعت پایین همگرایی و افتادن در جواب‌های بهینه محلی می‌باشد.

ترکیب HS و GA بر پایه اضافه کردن دو اپراتور GA به نام‌های جهش^۱ و تقاطع^۲ به HS استوار است. اپراتور جهش به نوعی استثماری است که انحرافات کوچک تصادفی تولید می‌کند و از این رو جواب جدید در نزدیک منطقه والدین و منطقه با شانس بیشتر^۳ قرار می‌گیرد. اپراتور تقاطع به نوعی اکتشافی است که این خاطر انحرافات بزرگ تصادفی تولید می‌کند و بنابراین حل جدید به منطقه‌ای بین دو والد می‌پرد. در مقایسه HS، روش پیشنهادی HS-GA جستجوی منطقه جواب و زمان محاسبه همگرایی در منطقه محلی کمینه را کاهش می‌دهد. اصول

1. Mutation
2. Cross Over
3. Promising



شکل ۲: مراحل روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی ریزشبهه جزیره‌ای.

شرایط نامناسب گردد. در واقع با شناسایی باس‌های حساس به ناپایداری (پایین بودن این شاخص (رابطه (۴)) در واقع احتمال ناپایداری شبکه را دارد و منفی بودن این شاخص بیان‌کننده ناپایداری شبکه می‌باشد [۲۷]) سعی شده واحدهای تولید پراکنده در نزدیکی این باس‌ها نصب گردند تا عملکرد شبکه در صورت شرایط نامناسب بهبود یابد. بنابراین بهبود پایداری تابع هدف دوم، معادل بهینه‌سازی (۴) یا کمینه‌سازی تابع f_r خواهد بود

$$f_r = \frac{1}{VSI(i+1)}, \quad i = 1, 2, \dots, NB \quad (5)$$

۳-۳ تغییرات کلی ولتاژ

سومین تابع هدف، تغییرات کلی ولتاژ می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸]

$$f_r = \frac{\sum_{i=1}^{NB} |1 - V_i|}{NB} \quad (6)$$

با کمینه‌سازی (۶)، یک مشخصه ولتاژ می‌تواند به دست آید که منجر به کاهش تغییرات ولتاژ در ریزشبهه شود.

۳-۴ قیود

دو نوع قید مطابق زیر در مسئله بهینه‌سازی وجود دارد:

- قیود تساوی که معادلات پخش بار غیر خطی می‌باشند [۶]

$$P_{gi} = P_i + V_i \sum_{j=1}^{NB} (V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})) \quad (7)$$

$$Q_{gi} = Q_i + V_i \sum_{j=1}^{NB} (V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})) \quad (8)$$

- قیود نامساوی که شامل قیود ولتاژ، حرارتی و تولید توان است.

(۱) قید ولتاژ: قید اندازه‌های ولتاژ در شین‌های ریزشبهه می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۶]

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (9)$$

مرحله ۳ (پخش بار): اجرای پخش بار برای بردارهای جواب به منظور محاسبه پایداری ولتاژ، قیمت توان تولیدی و انحراف ولتاژ.
 مرحله ۴ (فازی): تعیین تناسب^۱ هر تابع هدف با استفاده از روش فازی (۱۶) و محاسبه $\mu_{f_1}, \mu_{f_2}, \mu_{f_3}$ بر مبنای f_1, f_2, f_3 .
 مرحله ۵ (ارزیابی تناسب): استفاده از (۳۲) برای پیدا کردن تابع تناسب.
 مرحله ۶ (به روز رسانی زمان): شمارش گر زمان به روز شود $(t = t + 1)$.
 مرحله ۷: هارمونی جدید (x_{new}) در HM_1 با توجه به مراحل زیر تولید شود:

- یک عدد تصادفی (M) در محدوده $[0, 1]$ تولید شود.
 - اگر $M < HMCR$ باشد متغیر x_{newi} از حافظه (HM_1) تولید شود. با یک احتمال PAR, x_{newi} توسط یک مقدار کوچک اصلاح شود

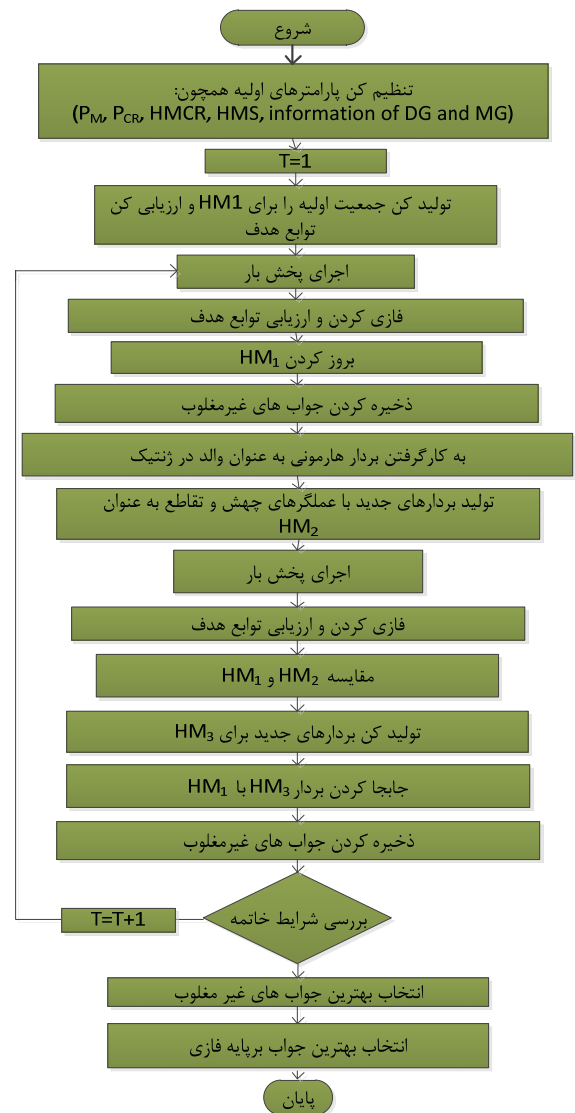
$$x_{newi} = x_{newi} + M \times BW \quad (15)$$

- اگر $M > HMCR$ باشد متغیر x_{newi} توسط یک انتخاب تصادفی از منطقه مورد قبول تولید شود.
 - اگر تابع تناسب بردار هارمونی جدید x_{new} بهتر از بدترین بردار هارمونی در HM_1 باشد موقعیت بردار در HM_1 را تغییر دهد.
 - تناسب هر بردار در HM_1 را ذخیره کند.
 مرحله ۸ (مقداردهی اولیه GA): هارمونی‌ها برای GA با استفاده از بردارهای HM_1 که مانند والدین در GA هستند تولید شوند.
 مرحله ۹: هارمونی‌های جدید توسط اپراتورهای تقاطع و جهش با استفاده از روش GA تولید و در HM_2 ذخیره شوند.
 مرحله ۱۰ (نخبه‌گرایی): هارمونی جدید در HM_3 با توجه به مراحل زیر تولید شوند:

- ادغام بردارهای HM_1 و جمعیت تولید شده در HM_2 الگوریتم ژنتیک.
 - یک پخش بار برای پیدا کردن بردارهای جواب HM_2 اجرا شود.
 - تناسب هر تابع هدف با استفاده از روش فازی تعیین شود (رابطه (۲۹)).
 - مرتب کردن آنها به ترتیب نزولی بر حسب مقدار تناسب و اجازه دادن به بهترین بردارها که برای HM_3 بر مبنای تناسب بردارهای HM_1 و HM_2 برای ادامه فرایند بهینه‌سازی انتخاب شوند.
 مرحله ۱۱: HM_1 و مخزن با توجه به مراحل زیر به روز شوند:
 - جابه‌جایی موقعیت بردارهای هارمونی در HM_1 با بردارهای پیداشده در HM_3 .
 - شناسایی همه غیر مغلوب‌ها و ذخیره در مخزن بر مبنای (۳۰) و (۳۱).
 مرحله ۱۲ (پایان): اگر معیار خاتمه تأمین نشده است به مرحله ۶ برود. قابل ذکر است که مراحل ۹ تا ۱۱ مرحله‌ای هستند که به HS متعارف در این مقاله اضافه شده‌اند. برای محاسبه توابع هدف در تکرار HS-GA، پخش بار پیشنهادی باید اجرا شود.

۴-۲ پخش بار پیشنهادی در ریزشبه‌های جزیره‌ای

در عمل، روش‌های مبتنی بر نیوتن-رافسون و سریع مجزا^۲ برای محاسبه پخش توان در سیستم‌های معمول بوده و به دلیل واگرایی ناشی از مقدار پایین نسبت X/R در ریزشبه، چنین روش‌هایی برای حل



شکل ۳: الگوریتم HS-GA برای طراحی عملکرد ریزشبه.

اساسی HS-GA می‌تواند بر حسب سه حافظه هارمونی یعنی HM_1, HM_2 و HM_3 مورد بحث قرار گیرد. ابتدا HM_1 شبیه روشی که در HS متعارف انجام می‌شود تولید می‌گردد. سپس بردارهای هارمونی در HM_1 به عنوان پله قبلی مانند والدین GA استفاده می‌شود به طوری که اپراتورهای جهش و تقاطع GA برای ایجاد بردارهای هارمونی جدید به HM_1 اعمال می‌شوند که در حافظه هارمونی HM_2 ذخیره می‌گردد. نهایتاً بردارهای هارمونی در HM_1 و HM_2 با توجه به تابع هدف برای پیدا کردن بهترین جواب که در حافظه هارمونی HM_3 نامیده می‌شود ذخیره و با هم مقایسه می‌گردند. قابل ذکر است که در HS، HM_1 به عنوان نسل بعدی در نظر گرفته می‌شود در صورتی که در HS-GA، HM_3 به عنوان نسل بعدی محسوب می‌گردد. مراحل HS-GA می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود (شکل ۳):

مرحله ۱: پارامترهای ورودی ریزشبه (مانند توپولوژی ریزشبه، اطلاعات بار و انشعاب).

مرحله ۲ (مقداردهی اولیه HS): $t = 0$ شود و بردارهای جواب در حافظه هارمونی HM_1 که شین‌های کاندید برای موقعیت‌های واحد تولید پراکنده و پارامترهای کنترلی را نشان می‌دهد تولید شوند

$$x_i^j = x_i^{\min} + rand(0, 1) \times (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \quad , \quad (14)$$

$$j = 1, \dots, HMS$$

1. Fitness

2. Fast-Decoupled

امپدانس خروجی اینورتر به علت استفاده از اندوکتانس توزیع، القایی می‌باشد و بنابراین زاویه فاز به ۹۰ درجه نزدیک شده و دو معادله اخیر به صورت زیر ساده می‌شوند

$$P = \frac{V}{Z} E \delta \quad (19)$$

$$Q = \frac{V}{Z} (E - V) \quad (20)$$

معادلات (۱۹) و (۲۰) نشان می‌دهند که توان اکتیو تابعی از زاویه توان و توان راکتیو تابعی از اندازه ولتاژ است. توان اکتیو و راکتیو می‌توانند به صورت مستقل با کنترل فرکانس و اندازه ولتاژ خروجی اینورتر تنظیم شوند. می‌توان (۱۹) و (۲۰) را بر مبنای کنترل‌های افتی $P-\omega$ و $Q-V$ به صورت زیر نوشت

$$\omega = \omega^* - S_p P \quad (21)$$

$$V = V^* - S_q Q \quad (22)$$

در روابط فوق ω^* و V^* مقادیر نامی فرکانس و اندازه ولتاژ و S_p و S_q بهره‌های افت استاتیکی توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشند. مقادیر S_p و S_q از روابط زیر به دست می‌آیند

$$S_p = \frac{\Delta \omega}{P_{DG_max}} \quad (23)$$

$$S_q = \frac{\Delta V}{Q_{DG_max}} \quad (24)$$

که $\Delta \omega$ حداکثر انحراف مجاز فرکانس، ΔV حداکثر انحراف مجاز ولتاژ و P_{DG_max} و Q_{DG_max} به ترتیب حداکثر ظرفیت توان اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده می‌باشند. شکل‌های ۵ و ۶ مشخصه‌های افتی واحدهای تولید پراکنده را برای تقسیم توان اکتیو و راکتیو نشان می‌دهند.

هر کدام از واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر کنترل افتی با توجه به مشخصه افتی (S_{pi}) و حداکثر توان نامی (P_i^{max}) در تأمین بارهای متصل، مشارکت می‌کند

$$S_{p1} P_i^{max} = S_{p2} P_i^{max} = \dots = S_{pi} P_i^{max} \quad (25)$$

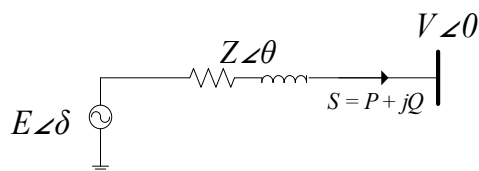
$$S_{q1} Q_i^{max} = S_{q2} Q_i^{max} = \dots = S_{qi} Q_i^{max} \quad (26)$$

با استفاده از (۲۱) و (۲۲) برای واحد تولید پراکنده i که با کنترل افتی کار می‌کند داریم

$$P_i = \frac{1}{S_{pi}} (\omega_i^* - \omega) \quad (27)$$

$$Q_i = \frac{1}{S_{qi}} (V_i^* - V_i) \quad (28)$$

برای تقسیم توان اکتیو و راکتیو در میان واحدهای تولید پراکنده، روابط $P-\omega$ و $Q-V$ ، $P-V$ ، $Q-V$ و $P-\omega$ یا $Q-\omega$ انتخاب می‌شوند. انتخاب هر کدام از این روابط بستگی به امپدانس خروجی اینورتر دارد. در این مقاله، امپدانس خروجی، القایی در نظر گرفته شده و در نتیجه، روابط $P-\omega$ و $Q-V$ مطابق (۲۷) و (۲۸) و شکل‌های ۵ و ۶ مد نظر می‌باشند. به طور کلی، روش‌های پخش بار چهار متغیر اصلی زاویه ولتاژ، اندازه ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو را برای باس‌های مختلف مانند PQ ، PV و باس‌های مبتنی بر مشخصه افتی در نظر می‌گیرند. در باس PQ ، مقادیر توان اکتیو و راکتیو معلوم و مقادیر



شکل ۴: مدار معادل یک منبع پراکنده متصل به یک باس مشترک.

مسئله پخش بار در سیستم‌های توزیع و ریزشیکه مؤثر نمی‌باشند. برای حل چنین مسائلی، الگوریتم‌های مختلفی در [۴] تا [۸] پیشنهاد شده‌اند. متأسفانه استفاده از چنین الگوریتم‌هایی با دو موضوع روبه‌رو است: یکی موضوع در نظر گرفتن باس کمکی^۱ و دیگری موضوع نداشتن ملاحظات افتی باس.

بنابراین لازم است که مسئله پخش بار طوری بازنویسی شود که باس افتی به جای باس کمکی در نظر گرفته شود. در پیوست مقاله، یک فرمول جدید برای مسئله تحلیل پخش بار در ریزشیکه جزیره‌ای برای مدل‌سازی حالت‌های مختلف کنترلی منابع تولید پراکنده مانند حالت PQ و حالت افتی آمده است. طراحی بر مبنای فرض فرکانس حالت ماندگار به عنوان یک متغیر مجهول قرار گرفته است (این فرکانس توسط روش پیشنهادی محاسبه و سپس معلوم و ثابت می‌شود) و باس‌های افتی به علاوه باس‌های PV و PQ معرفی شده‌اند. در روش‌های ارائه شده در پخش بار، مدل منابع تولید پراکنده به صورت توان ثابت و یا مدل کنترل شده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که چنین فرضی در یک ریزشیکه جزیره‌ای با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در حالت جزیره‌ای، یک پخش بار جدید پیشنهاد می‌گردد که در آن، فرکانس سیستم و ولتاژ باس‌های منابع تولید پراکنده به عنوان متغیرهای پخش بار مورد مطالعه قرار می‌گیرند و علاوه بر آن عملکرد منابع تولید پراکنده در مد کنترل شده و توان ثابت، عملکرد منابع تولید پراکنده بر پایه مد کنترل افتی مدل‌سازی می‌شوند و از فرکانس شبکه برای تأمین بار بین منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. این معادلات توسط یک روش بهینه‌سازی بهبود داده شده حل می‌شوند. تابع هدف مورد استفاده برای مسئله پخش بار شامل کمینه‌کردن عدم تعادل میان تولید و تقاضا در شبکه می‌باشد. در قسمت پیوست روش پخش بار در حالت جزیره‌ای فرمول‌بندی شده و فرکانس سیستم در (پ-۵) و (پ-۶) برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو نمایش داده شده است.

در باس کنترل افتی مطابق شکل ۴، شارش توان ظاهری، اکتیو و راکتیو در خط ارتباطی از روابط زیر به دست می‌آید

$$S = E < \delta \left[\frac{E < \delta - V}{Z < \theta} \right] \quad (16)$$

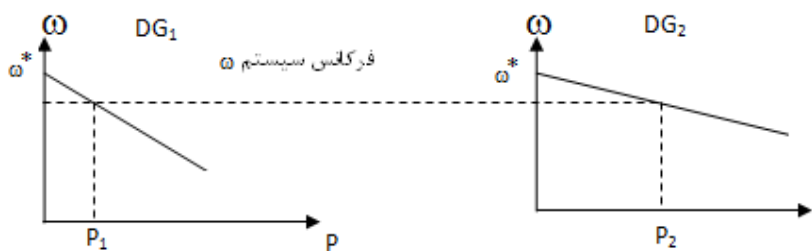
با فرض مقادیر کوچک δ ، مقدار توان اکتیو و راکتیو از روابط زیر محاسبه می‌شوند

$$P = \frac{V}{Z} [(E \cos \delta - V) \cos \theta + E \delta \sin \theta] \quad (17)$$

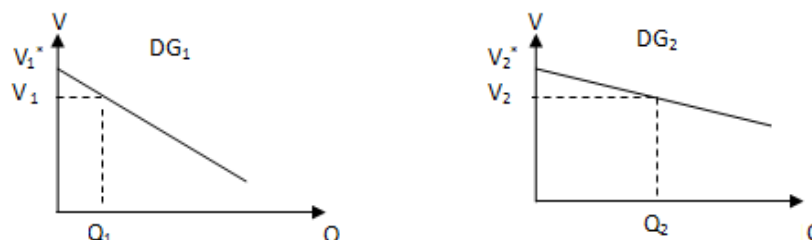
$$Q = \frac{V}{Z} [(E \cos \delta - V) \sin \theta - E \delta \cos \theta] \quad (18)$$

Z و θ به ترتیب اندازه و زاویه فاز امپدانس خط، E و V ولتاژهای خروجی منبع پراکنده و باس مشترک و δ اختلاف زاویه فاز بین دو ولتاژ مذکور می‌باشد. همان طور که در فصل بعد توضیح داده خواهد شد غالباً

1. Slack Bus



شکل ۵: تقسیم توان بار اکتیو توسط کنترل افتی.



شکل ۶: تقسیم توان بار راکتیو توسط کنترل افتی.

مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مغلوب باید در مخزن نگه داشته شوند. جواب x_1 مسلط بر x_r است اگر (۳۰) و (۳۱) صادق باشند

$$f_n(x_1) \leq f_n(x_r) \quad , \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, \tau\} \quad (30)$$

$$f_m(x_1) < f_m(x_r) \quad , \quad \exists m \in \{1, 2, \dots, \tau\} \quad (31)$$

که در آن x مدل‌کننده جواب‌ها، پارامترهای افتی و موقعیت واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. برای ارزیابی هر جواب موجود در مخزن تابع نرمالیزه‌شده زیر می‌تواند استفاده شود

$$\lambda_\mu(n) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} k_i \times \mu f_i(x_n)}{\sum_{n=1}^{N_{rep}} \sum_{i=1}^{N_{obj}} k_i \times \mu f_i(x_n)} \quad (32)$$

رابطه (۳۲) برای مرتب‌کردن جواب‌های غیر مغلوب با توجه به اولویت تصمیم‌ساز برای همه توابع هدف به کار می‌رود.

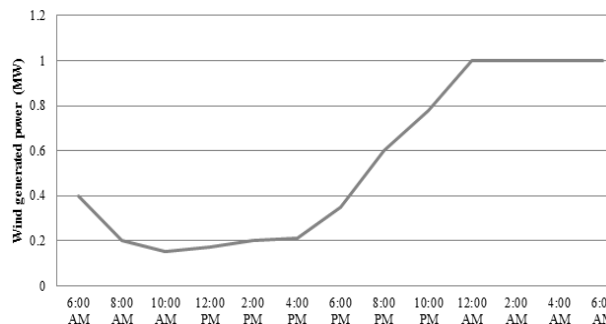
۴-۴ مدل‌سازی مولد بادی

برای تعریف توان بادی، تشریح سه ویژگی پایه‌ای ضروریست: جهت و سرعت باد، ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و چگالی هوا [۲۷]. بین این ویژگی‌ها سرعت باد، مهم‌ترین موضوع و شکل ۷ مشخصه مورد استفاده سرعت باد در این مقاله است. توان خروجی تولیدشده یک واحد بادی که با P_{wind} نشان داده می‌شود بر مبنای تغییرات سرعت می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود

$$P_{wind,t} = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq V_t \leq v_i \\ \frac{V_t - V_i}{V_r - V_i} & , \quad v_i \leq V_t \leq v_r \\ \beta & , \quad v_r \leq V_t \leq v. \\ 0 & , \quad v. \geq V_t \end{cases} \quad (33)$$

۵- بحث و نتایج عددی

دو نمونه مطالعه موردی بر مبنای عملکرد جزیره‌ای، آزمایش و توسط نرم‌افزار Matlab برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی شبیه‌سازی شده‌اند. در مورد اول، یک سیستم ۳۳ باسه تنها پارامترهای افتی بهینه



شکل ۷: مشخصه سرعت باد.

اندازه و زاویه فاز مجهول می‌باشند. یک باس PV نیز دارای مقادیر توان اکتیو و ولتاژ معلوم و مقادیر توان راکتیو و زاویه ولتاژ مجهول می‌باشد. در یک باس مبتنی بر مشخصه افتی، همه متغیرها مجهول هستند. معمولاً روش‌های پخش بار، فرکانس را مانند سیستم‌های قدرت بزرگ ثابت در نظر می‌گیرند در حالی که فرکانس در یک ریزشبه جزیره‌ای ثابت نبوده و باید به عنوان یک متغیر مجهول در حل مسأله پخش بار در نظر گرفته شود.

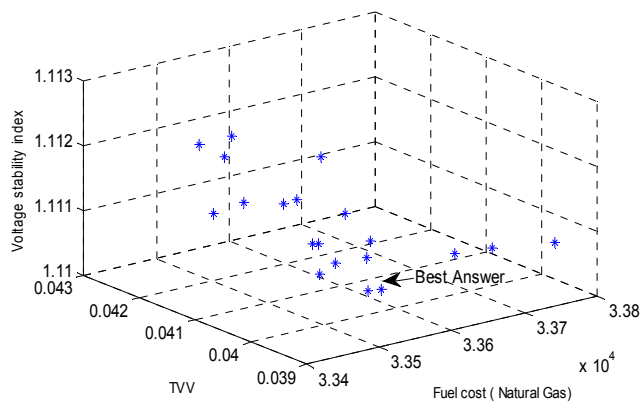
۴-۳ سه تابع عضویت فازی

در این مقاله، منطق فازی برای پیدا کردن بهترین جواب در دو قسمت جداگانه به کار گرفته شده است. یکی پیدا کردن بهترین جواب توابع هدف بهینه از مجموعه جواب‌های جبهه پارتو و دیگری پیدا کردن بهترین HM از دو بردار به دست آمده از GA و HS است. برای مجموعه جواب‌های جبهه پارتو، توابع عضویت فازی به صورت زیر داده می‌شود

$$\mu_{fi} = \begin{cases} 1 & , \quad f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & , \quad f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 0 & , \quad f_i \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (29)$$

$$i = 1, 2, 3$$

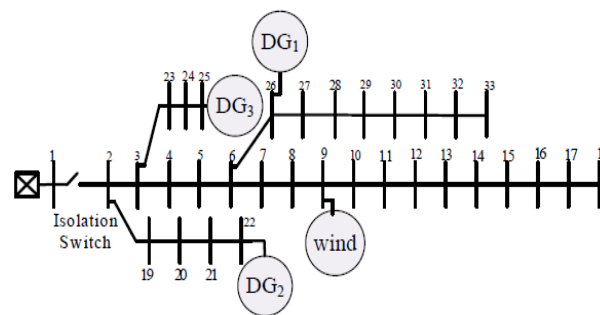
که μ_{fi} درجه شایستگی از تابع f_i و f_i^{\min} و f_i^{\max} به ترتیب بهترین و بدترین جواب‌های f_i هستند. قسمت خطی نیمه‌نزولی دوزنقه‌ای برای توابع عضویت فازی به کار رفته‌اند. برای حل توابع چندهدفه در هر تکرار،



شکل ۹: جواب جبهه پارتوی الگوریتم HS-GA (p.u).

جدول ۲: پارامترهای HS-GA

HMS	Iteration	CR	BW	PAR	HMCR	F
۲۰	۳۰	۰.۳۳	۰.۱	۰.۴۵	۰.۸	۰.۵۵



شکل ۸: یک سیستم ریزشبه جزیره‌ای ۳۳ باسه.

جدول ۱: داده‌های واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر کنترل کننده افی در سیستم ۳۳ باسه.

DGs	S_{max} (MVA)	q_{max} (Mvar)	Cost (\$/kwh)
۱	۲	۱.۲۰	۷.۷۰۵
۲	۱	۰.۶۰	۱۱.۷۳۱
۳	۱.۵	۰.۹	۱۰.۳۶۳
(WG) مولد بادی	۱	۰.۵۵	-

جدول ۳: داده‌های واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر کنترل کننده افی در ریزشبه ۳۳ باسه.

DGs	HS-GA				HS			
	S_p	S_q	V^*	ω^*	S_p	S_q	V^*	ω^*
۱	$5.98994E^{-4}$	$9.591E^{-4}$	۱.۰۰۴۰	۰.۹۹۹۶۷	$7.441E^{-4}$	$1.2116E^{-3}$	۱.۰۰۳۵	۰.۹۹۹۷۴
۲	$3.3519E^{-4}$	0.1228	۱.۰۰۸۳۱	۰.۹۹۸۸۷	$3.0488E^{-4}$	0.1795	۱.۰۰۴۵	۰.۹۹۸۶۱
۳	$1.4342E^{-4}$	$1.5384E^{-4}$	۱.۰۰۸۲	۱.۰۰۰۱	$1.3613E^{-4}$	$1.3326E^{-4}$	۱.۰۱۱۷	۱.۰۰۰۱۰
۴	$2.2694E^{-4}$	$5.8228E^{-4}$	۱.۰۰۱۴	۱.۰۰۰۲	$2.4138E^{-4}$	$5.3435E^{-4}$	۰.۹۹۹۱	۰.۹۹۹۹۸
DGs	GA				PD			
	S_p	S_q	V^*	ω^*	S_p	S_q	V^*	ω^*
۱	$9.43396E^{-4}$	$9.4869E^{-4}$	۱.۰۱۲۰	۱.۰۰۰۲	$1.1151E^{-3}$	۰.۱۲۵		
۲	$6.4186E^{-4}$	$2.8986E^{-4}$	۱.۰۰۲۷	۰.۹۹۸۹	$2.2284E^{-4}$	۰.۱۵۰	۱.۰۱۵	۱.۰۰۰
۳	$1.1064E^{-4}$	$1.9608E^{-4}$	۱.۰۱۳۴	۱	$1.4863E^{-4}$	۰.۱۳۳۳		
۴	$2.5877E^{-4}$	$5.03778E^{-4}$	۱.۰۰۰۷	۱.۰۰۰۵	$2.9712E^{-4}$	۰.۱۶۶۷		

شده" نامیده و با PD^۱ مشخص شده است. در همه این روش‌ها، پخش بار پیشنهادی استفاده شده و مقایسه بر مبنای بهترین راه حل انجام شده است. برای انجام این کار ابتدا جواب جبهه پارتوی هر روش به دست می‌آید و سپس با استفاده از یک راهکار فازی، بهترین جواب تعیین می‌گردد. شکل ۹، یک جبهه مؤثر در فضای سه‌بعدی و بهترین جواب بر مبنای تابع فازی نشان داده است.

جدول ۳ نتایج مقادیر پارامترهای کنترل مشخصه افی منابع تولید پراکنده که توسط روش‌های HS، GA و HS-GA به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. انحراف فرکانس و ولتاژ مجاز برای روش از پیش تعیین شده به ترتیب ۰.۵ تا ۵ درصد مقادیر نامی می‌باشد. برای این روش مقادیر ω^* و V^* طوری در نظر گرفته می‌شوند که توان مورد تقاضا و شرایط حفاظتی ریزشبه در الگوریتم پخش بار برآورده شود. جدول ۴ مقادیر حالت ماندگار فرکانس را که توسط هر روش محاسبه شده است ارائه می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که مقادیر فرکانس‌ها، قیود را ارضا کرده‌اند. جدول ۵ نتایج توان تولیدی واحد تولید پراکنده‌ها را که در هر روش محاسبه شده‌اند مقایسه می‌کند. جدول ۶ مقادیر توابع هدف

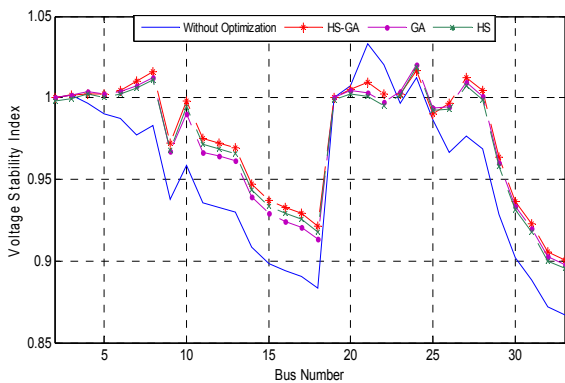
منابع پراکنده بر مبنای کنترل افی به دست آمده و فرض شده که محل منابع پراکنده از قبل تعیین شده است. در مورد دوم، یک سیستم ۶۹ باسه که در آن هم پارامترهای افی بهینه و هم محل منابع پراکنده به دست آمده است. واحدهای تولید پراکنده، توربین‌های گازی متصل به ژنراتورهای سنکرون می‌باشند.

۱-۵ ریزشبه ۳۳ باسه

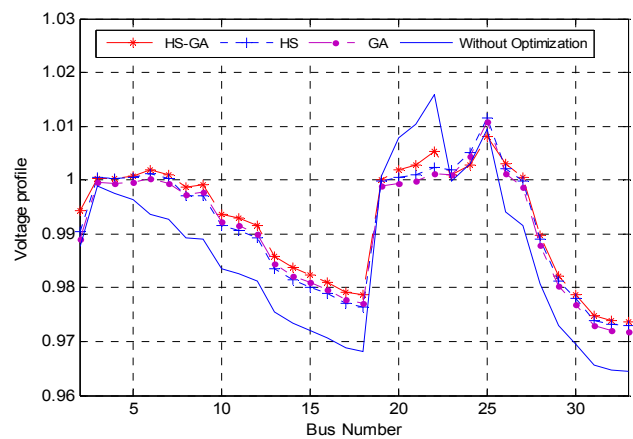
سیستم اول، یک سیستم ۳۳ باسه نشان داده شده در شکل ۸ است که از [۲۹] با بارهای اکتیو و راکتیو به ترتیب $3715 MW$ و $2730 MVar$ اقتباس شده است. چهار واحد تولید پراکنده بر روی باس‌های ۲۶، ۲۲، ۲۵ و ۹ قرار گرفته‌اند.

اطلاعات واحدهای تولید پراکنده و قیمت سوخت (گاز) در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای روش پیشنهادی در جدول ۲ آمده است.

عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های HS و GA مقایسه شده است. همچنین عملکرد روش پیشنهادی با روشی که پارامترهای واحد تولید پراکنده بدون اجرای هیچ گونه فرایند بهینه‌سازی از پیش تعیین شده‌اند مورد مقایسه قرار گرفته است. در اینجا این روش را "روش از پیش تعیین



شکل ۱۱: مشخصه VSI ریزشکبه برای روش‌های مختلف.



شکل ۱۰: مشخصه ولتاژ باس‌های ریزشکبه برای روش‌های مختلف.

جدول ۴: مقادیر حالت ماندگار فرکانس.

Methods	HS-GA	HS	GA	PD
Steady state frequency	۰٫۹۹۸۶۵	۰٫۹۹۸۵۱	۰٫۹۹۸۷۰	۰٫۹۹۸۴۰

جدول ۵: توان تولیدشده منابع پراکنده در روش‌های مختلف (PDG (MW), QDG (MVAR)).

Method	PDG _۱	QDG _۱	PDG _۲	QDG _۲	PDG _۳	QDG _۳	PWG	QWG
HS-GA	۱٫۷۰۸۷	۱٫۰۴۳۱	۰٫۳۵۸۷	۰٫۲۴۲۶	۱٫۰۰۸۵	۰٫۶۵۳۳	۰٫۶۷۸۹	۰٫۳۹۲۷
HS	۱٫۶۴۹۲	۱٫۰۶۸۸	۰٫۳۳۹۲	۰٫۱۱۷۹	۱٫۱۶۹۱	۰٫۷۴۸۵	۰٫۶۰۹۳	۰٫۳۹۷۶
GA	۱٫۵۹۱۶	۱٫۰۲۹۷	۰٫۲۹۱۳	۰٫۱۱۳۸۷	۱٫۱۸۱۹	۰٫۷۶۹۹	۰٫۶۹۱۷	۰٫۳۸۸۹
PD	۰٫۴۳۷۵	۰٫۵۸۱۴	۰٫۷۱۷۲	۰٫۴۹۰۶	۱٫۰۷۵۲	۰٫۸۲۱۲	۰٫۵۲۷۹	۰٫۴۵۰۴

جدول ۶: مقایسه توابع هدف الگوریتم پیشنهادی و دیگر روش‌ها.

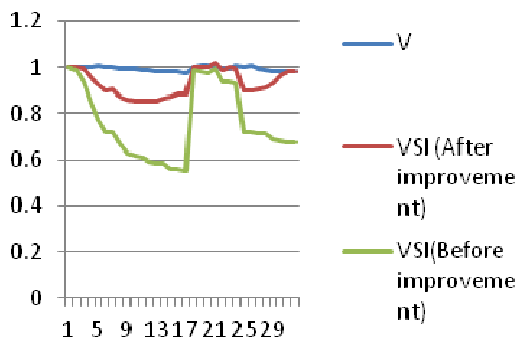
Objective function	HS-GA	HS	GA	PD	Newton-trust [%]
f _۱ (\$/h)	۳۳۵۸۶٫۷۳	۳۳۸۵۷٫۸۷	۳۳۷۹۵٫۰۶	۳۵۲۵۰٫۳۲	۳۳۸۲۹٫۰۳
f _۲ (p.u.)	۱٫۱۱۰۳	۱٫۱۱۳۹	۱٫۱۱۴۱	۱٫۱۵۳۳	۱٫۱۱۲۵
f _۳ (p.u.)	۰٫۰۴۰۱	۰٫۰۴۵۵	۰٫۰۴۲۲	۰٫۰۷۲۴	۰٫۰۵۲۶

جدول ۷: توان تولیدشده و تلفات اکتیو و راکتیو در روش‌های مختلف (P (MW), Q (MVAR)).

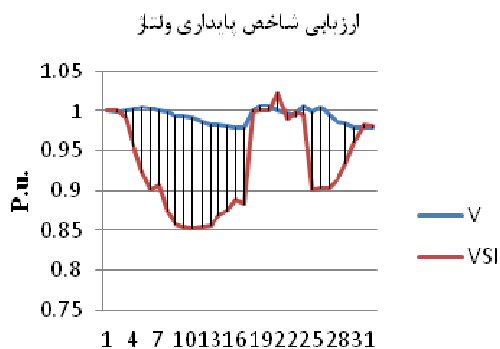
Method	PDG	QDG	P _{loss}	Q _{loss}
HS-GA	۳٫۷۵۴	۲٫۳۳۲۰	۰٫۰۳۹۸	۰٫۰۳۱۷
HS	۳٫۷۵۸	۲٫۳۳۴	۰٫۰۴۲۱	۰٫۰۳۲۹
GA	۲٫۷۵۶۶	۲٫۳۳۳۰	۰٫۰۴۱۷	۰٫۰۳۲۸
PD	۳٫۷۶۷۸	۲٫۳۴۳۴	۰٫۰۵۲۸	۰٫۰۴۳۶

است که این روش در تنظیم پارامترهای افتی واحدهای واحد تولید پراکنده در عملکرد حالت ماندگار مؤثرتر است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مشخصه ولتاژ و VSI ریزشکبه تولیدشده توسط HS-GA و دیگر روش‌ها را نمایش می‌دهند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که روش HS-GA، بهترین و روش از پیش تعیین شده، بدترین مشخصه ولتاژ را ایجاد می‌کند. همچنین این شکل نشان می‌دهد با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، مشخصه ولتاژ در اکثر باس‌ها بهبود یافته که این موضوع در باس ۱۸ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور مشابه، شکل ۱۱ نشان می‌دهد که HS-GA بهترین و روش از پیش تعیین شده بدترین VSI را به دست می‌دهد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که استفاده از پارامترهای بهینه برای واحدهای تولید پراکنده به بهبود VSI کمک می‌کند. دیگر برجستگی راهکار مقاله، تنظیم پارامترهای مشخصه افتی واحدهای تولید پراکنده است به گونه‌ای که آنها به عنوان مهم‌ترین محرک برای کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشکبه جزیره‌ای و پخش توان بین واحدهای تولید پراکنده به حساب می‌آیند. برای انجام آن، پارامترهای افتی می‌توانند به عنوان متغیرهای مجهول در نظر گرفته شوند و مقادیر بهینه آنها توسط HS-GA برای کمینه‌سازی توابع هدف محاسبه می‌گردد. به عنوان مثال، جدول ۳ را برای نتایج تنظیم بهینه پارامترهای افتی ببینید. همچنین شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه نتایج با بهینه‌سازی و بدون بهینه‌سازی چنین پارامترهایی را نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده در

محاسبه‌شده توسط روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، پایین‌ترین (بهترین) مقادیر توابع هدف و روش از پیش تعیین شده، بالاترین (بدترین) مقادیر را تولید کرده اند. این نتیجه، مؤثر بودن روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. قابل ذکر است که مطابق جدول ۱ اگر تنها قیمت مد نظر باشد، DG_۱ بعد از DG_۴ بهترین تولیدکننده است. هرچند اگر مطابق جدول ۶ مانند دیگر توابع هدف، مشخصه ولتاژ و تابع هدف ملاک باشد به ترتیب DG_۱، DG_۳، DG_۴ و DG_۲ از بالا به پایین بهترین تا بدترین هستند (جدول ۵). این موضوع، لزوم در نظر گرفتن توابع چندهدفه در پیدا کردن محل بهینه و عملکرد منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. جدول ۷ کل توان تولیدشده توسط واحدهای تولید پراکنده و تلفات سیستم را در روش‌های مختلف نمایش می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، پایین‌ترین تلفات اکتیو و راکتیو را در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد که نشان‌دهنده آن



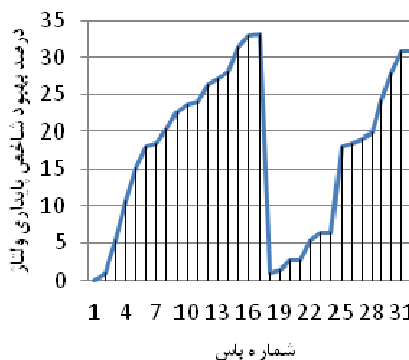
شکل ۱۳: شاخص پایداری برای ریزشبهه ۳۳ باسه قبل و بعد از بهبود.



شکل ۱۲: اندازه ولتاژ و شاخص پایداری برای ریزشبهه ۳۳ باسه.

جدول ۸: داده‌های واحدهای واحد تولید پراکنده مبتنی بر کنترل کننده افتی در سیستم ۶۹ باسه.

واحد تولید پراکنده	S_{max} (MVA)	q_{max} (Mvar)	Cost (\$/kwh)
۱	۱٫۵	۰٫۹	۷٫۷۰۵
۲	۰٫۵	۰٫۳	۸٫۷۳۱
۳	۱	۰٫۶	۸٫۴۶۳
مولد بادی (WG۱)	۱	۰٫۴۵	-
مولد بادی (WG۲)	۱	۰٫۴۵	-



شکل ۱۴: درصد بهبود شاخص پایداری برای ریزشبهه ۳۳ باسه.

جدول ۹: مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی در تنظیم پارامترهای کنترل کننده افتی واحد تولید پراکنده‌ها.

DGs	HS-GA				HS				GA			
	Sp	Sq	V^*	ω^*	Sp	Sq	V^*	ω^*	Sp	Sq	V^*	ω^*
۱	$۳٫۴۸۴۶E^{-۳}$	$۲٫۲۶۸۱E^{-۳}$	۱٫۰۱۰۲	۰٫۹۹۰۷	$۱٫۱۶۸۴E^{-۳}$	$۳٫۲۲۹۹E^{-۳}$	۱٫۰۲۰۷	۱٫۰۰۰۳	$۱٫۴۴۳۱E^{-۳}$	$۱٫۷۵۶۳E^{-۳}$	۱٫۰۲۸۰	۱٫۰۰۰۱
۲	$۳٫۳۶۵۴E^{-۳}$	$۵٫۹۰۸۹E^{-۳}$	۱٫۰۰۸۷	۰٫۹۹۸۰	$۴٫۱۰۹۲E^{-۴}$	$۳٫۱۲۶۶E^{-۳}$	۱٫۰۲۵۰	۰٫۹۹۹۰۱	$۹٫۴۱۵۵E^{-۴}$	$۵٫۶۹۸۰E^{-۳}$	۱٫۰۰۴۰	۰٫۹۹۹۰۴
۳	$۳٫۲۴۱۸E^{-۳}$	$۶٫۲۹۱۹E^{-۳}$	۱٫۰۱۰۰	۰٫۹۹۹۰	$۱٫۵۵۰۴E^{-۳}$	$۱٫۵۲۵۱E^{-۳}$	۱٫۰۰۹۱	۱٫۰۰۰۴	$۲٫۱۶۲۸E^{-۳}$	$۴٫۹۲۹۷E^{-۳}$	۰٫۹۹۵۰	۱٫۰۰۰۱
۴	$۸٫۸۳۸۶E^{-۴}$	۰٫۰۳۶۱۸	۱٫۰۲۷۰	۰٫۹۹۸۱۱	$۲٫۱۷۵۴۴E^{-۳}$	$۵٫۶۲۵۹E^{-۳}$	۱٫۰۲۸۰	۱٫۰۰۰۴	$۲٫۲۸۶۹E^{-۳}$	۰٫۰۲۹۹۱	۱٫۰۲۲۰	۱٫۰۰۰۴
۵	$۸٫۷۲۱۲E^{-۵}$	$۲٫۶۲۸۳E^{-۳}$	۰٫۹۹۸۴	۰٫۹۹۷۵۵	$۱٫۳۱۹۷E^{-۳}$	$۱٫۸۶۱۴E^{-۳}$	۱٫۰۰۹۰	۱٫۰۰۰۱	$۴٫۵۹۴۷E^{-۴}$	$۱٫۵۰۸۵E^{-۳}$	۱٫۰۰۰۵	۰٫۹۹۹۰

ساکن واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. داده‌های مربوط به واحدهای تولید پراکنده و قیمت سوخت (گاز) در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۹ مقادیر بهینه‌شده در تنظیم پارامترهای کنترل کننده افتی واحدهای تولید پراکنده را بر مبنای روش‌های بهینه‌سازی مختلف نشان می‌دهد. باید توجه داشت که این مقادیر، متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند. توان تولیدی بر مبنای متغیرهای محاسبه‌شده در جدول ۹ ایجاد شده‌اند (جدول ۱۲). جدول ۱۱ مقادیر حالت ماندگار فرکانس محاسبه‌شده توسط هر روش را ارائه می‌دهد و همه مقادیر فرکانس‌ها قیود را ارضا می‌کنند. جدول ۱۲ نتایج را برای توان تولیدشده واحدهای تولید پراکنده در روش‌های مختلف با هم مقایسه می‌کند. جدول ۱۰ مقادیر توابع هدف محاسبه‌شده توسط روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها را با هم مقایسه می‌کند. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بهتر از دیگر روش‌ها کار می‌کند. برای مثال جدول ۱۰ نشان می‌دهد که قیمت سوخت (f_1) در بازه یک ساله با HS-GA پایین‌ترین مقدار و با روش HS دارای بالاترین مقدار است. علاوه بر آن جدول ۱۳ توان تولیدشده توسط واحدهای تولید پراکنده و تلفات توان سیستم که توسط هر روش محاسبه شده است را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی پایین‌ترین تلفات توان اکتیو را دارد.

سیستم ۳۳ باسه با روش نیوتن تراست بر مبنای [۳۱] مقایسه شده‌اند. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

همان طور که از نتایج مشخص است، HS-GA بهبود بهتری در عملکرد ریزشبهه دارد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نمودارهای مربوط به اندازه ولتاژ و شاخص پایداری را نمایش می‌دهند. همان طور که از این شکل‌ها مشخص است، باس‌های ۵ تا ۱۸ و ۲۵ تا ۳۳ دارای شاخص پایداری ولتاژ زیر ۰٫۸ می‌باشند که نشان‌دهنده احتمال فروپاشی ولتاژ در آنها می‌باشد. بنابراین با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی و تنظیم مقادیر S_p ، S_q ، V^* و ω^* ، شاخص پایداری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۱۴ در برخی باس‌ها تا ۳۳ درصد افزایش در شاخص پایداری ولتاژ ایجاد شده است.

۲-۵ ریزشبهه ۶۹ باسه

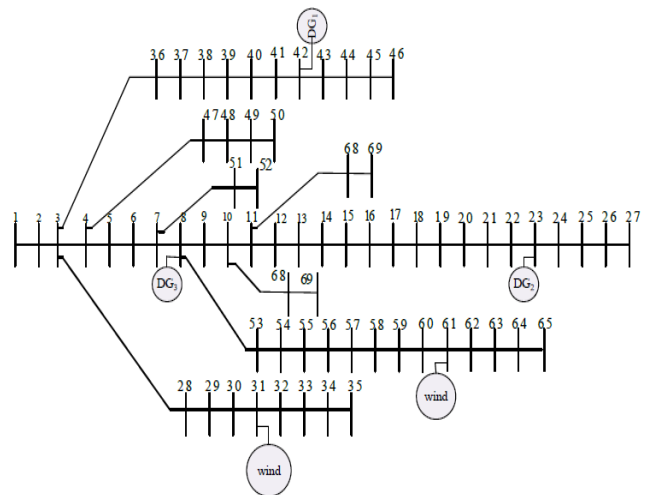
سیستم دوم، یک سیستم ۶۹ باسه که از [۲۹] گرفته شده است با مجموع توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب $۳٫۷۷۲$ MW و $۲٫۶۹۴$ MVar با محل‌های بهینه پنج واحد تولید پراکنده در شکل ۱۵ نشان داده شده است. داده‌های واحدهای تولید پراکنده و قیمت گاز بر مبنای [۲۶] می‌باشد. سه پارامتر شامل ولتاژ و فرکانس مرجع به علاوه بهره افتی

جدول ۱۰: مقایسه توابع هدف در روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها.

Index	Methods		
	HS-GA	HS	GA
f_1 (\$)	۲۴۴۲۷۴۳۱۹	۲۴۵۹۳۶۵۷۳	۲۴۴۹۶۶۱۹۵
f_2 (p.u.)	۱/۰۱۹۷	۱/۰۱۸۶	۱/۱۱۴۱
f_3 (p.u.)	۰/۰۲۰۳	۰/۰۷۴۴	۰/۰۴۲۲

جدول ۱۱: مقادیر حالت ماندگار فرکانس.

Methods	HS-GA	HS	GA
Steady state frequency	۰/۹۹۷۴۷	۰/۹۹۸۸۵	۰/۹۹۸۶۱



شکل ۱۵: سیستم ۶۹ بارسه ریزشکه جزیره‌ای.

جدول ۱۲: توان تولیدشده منابع پراکنده سیستم ۶۹ بارسه در روش‌های مختلف (PDG (MW), QDG (MVAR)).

Method	PDG ₁	QDG ₁	PDG ₂	QDG ₂	PDG ₃	QDG ₃	PWG ₁	QWG ₁	PWG ₂	QWG ₂
HS-GA	۱/۱۰۱۳	۰/۷۸۷۷	۰/۲۳۳۵	۰/۲۸۹۵	۰/۷۰۲۰	۰/۴۷۸۴	۰/۷۴۴۶	۰/۵۱۰۰	۰/۹۴۰۴	۰/۶۴۸۹
HS	۱/۲۴۰۶	۰/۸۷۴۴	۰/۲۶۰۵	۰/۱۹۶۲	۰/۶۵۱۳	۰/۴۶۵۶	۰/۷۱۰۴	۰/۴۹۴۸	۰/۹۵۱۲	۰/۶۹۶۰
GA	۱/۰۳۰۴	۰/۷۴۳۰	۰/۴۶۱۴	۰/۲۱۴۰	۰/۶۹۰۳	۰/۵۵۲۹	۰/۷۸۱۵	۰/۵۵۳۸	۰/۸۵۰۹	۰/۶۶۳۳

جدول ۱۴: نتایج تحلیل آماری برای روش‌های مختلف.

	HS-GA		HS		GA	
	SD (%)	BM	SD (%)	BM	SD (%)	BM
f_1 (\$)	۱/۴۱	۲۴۴۷E ^۵	۲۴۴۹E ^۵	۲/۰۳	۲۴۶۳E ^۵	۲۴۸۲E ^۵
f_2 (p.u.)	۱/۰۱	۱/۱۱۷	۱/۲۰۴	۱/۶۴	۱/۰۹۱	۱/۲۸۶
f_3 (p.u.)	۰/۵۵	۰/۰۳۷۹	۰/۰۳۹۴	۰/۸۷	۰/۰۸۶۱	۰/۰۹۱

می‌دهد که نشان‌دهنده توانایی HS-GA در ایجاد ارتباط‌های متقابل و مؤثر در بین متغیرهای تصمیم‌ساز است. علاوه بر آن جداول ۶ و ۱۰ نشان می‌دهند که HS-GA قادر به ایجاد پایین‌ترین مقادیر برای توابع هدف در مقایسه با HS و GA است. جدول ۹ نتایج نقطه کار بهینه واحدها را نمایش می‌دهد که به وسیله سیستم کنترل مرکزی به واحدهای کنترل اکتی ارسال می‌گردد. جهت مقایسه نتایج توابع هدف، جداول ۱۰ و ۱۴ آورده شده‌اند. در حالت عملکرد جزیره‌ای، واحدهای تولید پراکنده باید قادر باشند تقاضای بارهای موجود در ریزشکه را حفظ کنند و این کار در واحدهایی که بر پایه کنترل اکتی مدل می‌شوند مستلزم عملکرد هماهنگ بین پارامترهای این واحدها می‌باشد و چون در حالت جزیره‌ای، واحدها با حداکثر توان خودکار می‌کنند و در حالت متصل به شبکه، کنترل اکتی نقشی نخواهد داشت و میزانی از توان ریزشکه از شبکه بالادست تأمین می‌شود لذا تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع در حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه امری متفاوت خواهد بود. از این رو در این کار سعی شده که مکان منابع و عملکرد بهینه آنها با در نظر گرفتن استراتژی عملکرد در حالت مستقل تعیین شوند که بهینه‌کردن پارامترهای کنترل‌کننده‌های اکتی نیز مورد هدف قرار می‌گیرند. توجه شود که توان خروجی واحدهای تولید پراکنده بر اساس پیوست و (پ-۵) و (پ-۶) وابسته به ضرایب کنترل اکتی می‌باشد که تنظیم مناسب این پارامترها تأثیر به‌سزایی در عملکرد بهینه دارد. جدول ۶ نتایج بهینه‌سازی پارامترهای دروپ را برای حالت‌های مختلف نشان داده و با نتایج بدون بهینه‌سازی نیز مقایسه کرده است که نشان از ضرورت بهینه‌سازی پارامترها در عملکرد ریزشکه دارد.

جدول ۱۳: توان تولیدشده و تلفات اکتیو و راکتیو منابع پراکنده در روش‌های مختلف برای سیستم ۶۹ بارسه (PDG (MW), QDG (MVAR)).

Methods	PDG	QDG	P_{loss}	Q_{loss}
HS-GA	۳/۸۱۱۷	۲/۷۲۵۶	۰/۰۳۹۵	۰/۰۳۱۷
HS	۳/۸۱۴۰	۲/۷۲۶۸	۰/۰۴۲۱	۰/۰۳۲۹
GA	۳/۸۱۳۷	۲/۷۲۶۷	۰/۰۴۱۷	۰/۰۳۲۸

برای اجرای برخی تحلیل‌های آماری، انحرافات استاندارد (SD)، بهترین میانگین (BM)^۲ و بدترین مقدار (WV)^۳ توابع هدف سیستم ۶۹ بارسه با ۶۰ اجرا برای HS-GA، HS و GA محاسبه شده و در جدول ۱۴ آمده است. بهترین میانگین، توانایی همگرایی و انحراف استاندارد، پایداری روش‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که یک راهکار فازی در این مقاله برای پیدا کردن بهترین جواب از جبهه پارتو به کار رفته است. به عنوان مثال، جدول ۱۴ یک مقایسه در بین روش‌های بهینه‌سازی انجام شده مبتنی بر شاخص‌ها، SD ، BM و WV نشان می‌دهد که نشان‌دهنده این است که روش پیشنهادی عملکرد بهتری داشته است. جدول ۱۴ پایین‌ترین شاخص SD را برای HS-GA برای نشان دادن یکنواختی نتایج تولیدشده توسط HS-GA نشان می‌دهد. این جدول پایین‌ترین مقدار شاخص‌های BM و WV را برای HS-GA نشان

1. Standard Deviations
2. Best Mean
3. Worst Value

- N_{obj} : تعداد توابع هدف
- N_{rep} : تعداد راه حل‌ها در مخزن
- NB : تعداد باس‌ها
- N_{dr} : تعداد منابع پراکنده دارای کنترل‌کننده افتی
- P_i, Q_i : دیماند توان‌های اکتیو و راکتیو باس i
- P_{gi}, Q_{gi} : توان اکتیو و راکتیو تحویل‌شده به باس i
- P_{i+1}, Q_{i+1} : مجموع توان اکتیو و راکتیو در باس $i+1$
- P_{gi}^{max} : توان اکتیو بیشینه DG_i
- P_j : توان اکتیو تزریقی به باس j
- Q_{gi}^{max} : توان راکتیو بیشینه DG_i
- Q_j : توان راکتیو تزریقی به باس j
- X_i, R_i : مقاومت و راکتانس خط i
- S_{gi}^{max} : توان ظاهری بیشینه DG_i
- μ_{f1} : درجه مطلوبیت
- μ_{f2} : تابع نرمالیزه‌شده

پیوست

الگوریتم پخش بار پیشنهادی

محاسبه برای باس‌های PQ : در این مقاله، مدل [۳۲] پذیرفته و برای باس‌های PQ اصلاح گردیده است. مقدار اندازه ولتاژ و زاویه فاز باس به ترتیب می‌تواند از روابط زیر محاسبه گردد

$$V_j^x = \sqrt{[rP_j + x(\omega) \cdot Q_j - \frac{V_i^x}{\gamma}]^2 - [r^x + x^x] \cdot [P_j^x + Q_j^x]} \quad (۱-پ)$$

$$-\left[rP_j + x(\omega) \cdot Q_j - \frac{V_i^x}{\gamma} \right]$$

$$\delta_j = \delta_i - \sin^{-1} \frac{x(\omega)P_j - rQ_j}{V_i V_j} \quad (۲-پ)$$

محاسبه برای باس‌های افتی: مقادیر مجهول یک باس افتی مطابق شکل ۱۶ می‌تواند با توان اکتیو و راکتیو، اندازه ولتاژ و زاویه مشخص شود. مقادیر تزریق توان باس j در شکل ۱۶ به صورت زیر داده می‌شود

$$P_j = -P_{DG} + P_{load} + P_T \quad (۳-پ)$$

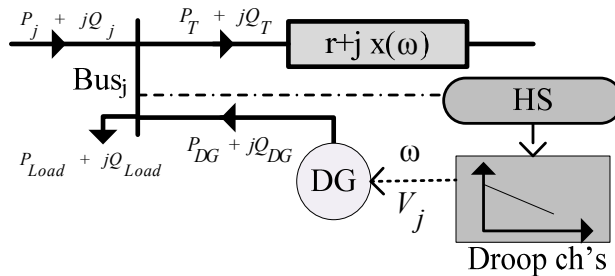
$$Q_j = -Q_{DG} + Q_{load} + Q_T \quad (۴-پ)$$

محاسبه برای باس‌های افتی: مقادیر مجهول یک باس افتی مطابق شکل ۱۶ می‌تواند با توان اکتیو و راکتیو، اندازه ولتاژ و زاویه مشخص شود. مقادیر تزریق توان باس j در شکل ۱۶ به صورت زیر داده می‌شود: پخش توان اکتیو و راکتیو بستگی به فرکانس و ولتاژ محلی هر واحد واحد تولید پراکنده دارد و با روابط زیر محاسبه می‌شوند

$$P_{DGi} = \frac{1}{sp_i} (\omega_i^* - \omega) \quad (۵-پ)$$

$$Q_{DGi} = \frac{1}{sq_i} (|V_i^*| - V_i) \quad (۶-پ)$$

برای محاسبه، زاویه فاز باس انتهایی دریافت‌کننده (پ-۲) به کار رفته که P_j و Q_j با (پ-۳) و (پ-۴) داده شده است. این موضوع برای مواردی معتبر است که P_j و Q_j در محدوده مجاز واحدهای واحد تولید پراکنده باشند. در غیر این صورت P_j و Q_j باید به عنوان متغیرهای معلوم در



شکل ۱۶: توان تزریق‌شده توسط منبع تولید پراکنده به باس مبتنی بر مشخصه افتی j .

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای پیدا کردن عملکرد بهینه منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر کنترل افتی پیشنهاد شده است. ایده اصلی در اینجا حل موضوعاتی است که توسط روش‌های متعارف در ریزشبه‌های جزیره‌ای قابل حل نمی‌باشند. راهکار ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند بر حسب پارامترهای افتی منابع تولید پراکنده به عنوان محرک اصلی کنترل فرکانس و کنترل ریزشبه جزیره‌ای و پخش توان بین منابع تولید پراکنده مورد بحث قرار گیرد. در این روش، پارامترهای افتی به عنوان متغیرهای مجهول در نظر گرفته شده و مقادیر بهینه آنها توسط HS-GA برای کمینه‌سازی توابع هدف محاسبه می‌شوند. علاوه بر آن، دو موضوع در پخش توان متعارف، باس کمکی و نبودن ملاحظات باس افتی برای محاسبه مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده افتی مورد بحث قرار گرفته‌اند. ویژگی دیگر مقاله این است که الگوریتم HS با استفاده از عملگرهای جهش و تقاطع در الگوریتم ژنتیک، بسط داده شده است. این روش، HS را در کاوش و بهره‌برداری جواب در موارد مختلف به طور مؤثری بهبود می‌بخشد. در این مقاله دو مثال ۳۳ و ۶۹ باس مورد مطالعه قرار گرفته است. در مثال ۳۳ باسه، مکان واحدهای تولید پراکنده ثابت بوده و تنها ظرفیت واحدها مورد مطالعه قرار گرفته است. در مثال دوم با فرض بار ثابت شبکه مسئله جایابی با تنظیم پارامترهای افتی واحدها انجام گرفته است چرا که در حالت عملکرد جزیره‌ای، واحدهای تولید پراکنده باید قادر باشند تقاضای بارهای موجود در ریزشبه را حفظ کنند و این کار در واحدهایی که بر پایه کنترل افتی مدل می‌شوند مستلزم عملکرد هماهنگ بین پارامترهای این واحدها می‌باشد و چون در حالت جزیره‌ای، واحدها با حداکثر توان خود کار می‌کنند و در حالت متصل به شبکه دیگر کنترل افتی نقشی نخواهد داشت و میزانی از توان ریزشبه از شبکه بالادست تأمین می‌شود، لذا تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع در حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه امری متفاوت خواهد بود. از این رو در این کار سعی شده است مکان منابع و عملکرد بهینه آنها با در نظر گرفتن استراتژی عملکرد در حالت مستقل تعیین شوند که بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌های افتی نیز مورد هدف قرار می‌گیرند.

۷- فهرست واژه‌ها

- BW : پهنای باند
- $HMCR$: نرخ بررسی حافظه هارمونی
- HMS : اندازه حافظه هارمونی
- PAR : نرخ تنظیم گام
- $C_m(P_{DG_i})$: مصرف سوخت DG_i
- I_i, I_{imax} : جریان و جریان نامی خط i
- Ki : اولویت تصمیم‌ساز برای همه توابع هدف

[11] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2346-2352, Sep. 2008.

[12] A. K. Basu, A. Bhattacharya, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro grid," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 27, no. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.

[13] S. Conti, R. Nicolosi, S. A. Rizzo, and H. H. Zeineldin, "Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded microgrids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1243-1251, Jul. 2012.

[14] A. Basu, A. Bhattacharya, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based microgrid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.

[15] B. Khorramdel and M. Raoofat, "Optimal stochastic reactive power scheduling in a microgrid considering voltage droop scheme of DGs and uncertainty of wind farms," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 994-1006, Sept. 2012.

[16] E. Dilettoso, S. A. Rizzo, and N. Salerno, "SALHE-EA: a new evolutionary algorithm for multi-objective optimization of electromagnetic devices," in *Intelligent Computer Techniques in Applied Electromagnetics*, vol. 119, pp. 37-45, 2008.

[17] J. Mitra, M. R. Vallem, and S. B. Patra, "A probabilistic search method for optimal resource deployment in a microgrid," in *Proc. 9th Int. Conf. Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 6 pp., Stockholm, Sweden, Jun. 2006.

[18] M. Pipattanasomporn, M. Willingham, and S. Rahman, "Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 206-212, Feb. 2005.

[19] J. Oyarzabal, J. Jimeno, J. Ruela, A. Engler, and C. Hardt, "Agent based micro grid management system," in *Proc. Int. Conf. on Future Power Systems*, 6 pp., 18-18 Nov. 2005.

[20] H. E. Farag, M. M. A. Abdelaziz, and E. F. El-Saadany, "Voltage and reactive power impacts on successful operation of islanded microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1716-1727, May 2013.

[21] G. Diaz and C. Gonzalez-Moran, "Fischer-burmeister-based method for calculating equilibrium points of droop-regulated microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 959-967, May 2012.

[22] N. R. Ullah, K. Bhattacharya, and T. Thiringer, "Wind farms as reactive power ancillary service providers-technical and economic issues," *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 24, no. 3, pp. 661-672, Sept. 2009.

[23] R. H. Lasseter and P. Piagi, "Microgrid: a conceptual solution," in *Proc. of 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 6, pp. 4285-4290, Aachen, Germany, 20-25 Jun. 2004.

[24] G. Antonis and D. Hatziaargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation," *IEEE Trans. Energy Conversation*, vol. 23, no. 1, pp. 241-248, Mar. 2008.

[25] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 673-681, May-Jun. 2005.

[26] Z. W. Geem, J. H. Kim, and G. V. Loganathan, "A new heuristic optimization algorithm: harmony search," *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60-68, Feb. 2001.

[27] B. Khorramdel and M. Raoofat, "Optimal stochastic reactive power scheduling in a microgrid considering voltage droop scheme of DGs and uncertainty of wind farms," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 994-1006, Sept. 2012.

[28] K. S. Lee and Z. W. Geem, "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 194, no. 36-38, pp. 3902-3933, Sept. 2005.

[29] B. Venkatesh and R. Ranjan, "Data structure for radial distribution power flow analysis," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 1, pp. 101-106, Jan. 2003.

[30] M. M. A. Abdelaziz and E. F. El-Saadany, "Maximum loadability consideration in droop-controlled islanded microgrids optimal power flow," *Electric Power Sys. Res.*, vol. 106, pp. 168-179, Jan. 2014.

[31] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 673-681, May 2005.

[32] M. H. Moradi, S. M. R. Tousi, and M. Abedini, "Multi-objective PFDE algorithm for solving the optimal siting and sizing problem of multiple DG sources," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 56, pp. 117-126, Mar. 2014.

نظر گرفته شوند که مقادیر آنها مساوی با محدوده مقادیر مربوط می باشد که در نتیجه، باس انتهایی دریافت کننده از حالت کنترل افتی به حالت PQ تبدیل می شود. بنابراین ضروری است که مسئله پخش توان برای مقادیر ولتاژ و زاویه فاز باس حل شود.

حل پخش بار پیشنهادی در ریزشیکه جزیره ای: هدف مسئله بهینه سازی، حداقل کردن مجموع مقادیر قدر مطلق عدم تطابق توان های اکتیو و راکتیو

$$f(x, u) = k_1 \left| \sum_{i=1}^{n_{bus}} \Delta P_i \right| + k_2 \left| \sum_{i=1}^{n_{bus}} \Delta Q_i \right| \quad (7-پ)$$

که x و u بردارهای حالت و مقادیر کنترلی هستند که به صورت زیر نمایش داده می شوند

$$x = [\delta \quad V_L^{PQ} \quad P_{DG}^{DR} \quad Q_{DG}^{DR}] \quad (8-پ)$$

$$u = [\omega \quad V_N^{DR} \quad \dots \quad V_N^{DR}] \quad (9-پ)$$

که δ و V_L^{PQ} مقدار و زاویه ولتاژ باس PQ ، P_{DG}^{DR} و Q_{DG}^{DR} توان اکتیو و راکتیو تولید شده باس افتی، V_N^{DR} ولتاژ باس افتی، ω فرکانس سیستم و N تعداد باس ها با یک کنترل کننده افتی است. n_{bus} تعداد باس ها و k_1 و k_2 ضرایب جریمه برای تابع هدف هستند. در (7-پ)، ΔP_i و ΔQ_i عدم تطابق های توان هستند و مطابق زیر محاسبه می شوند

$$\Delta P_i = P_{DG_i} - P_{Load_i} - \sum_j (V_i V_j Y_{ij}(\omega) \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})) \quad (10-پ)$$

$$\Delta Q_i = Q_{DG_i} - Q_{Load_i} - \sum_j (V_i V_j Y_{ij}(\omega) \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})) \quad (11-پ)$$

مراجع

[1] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziaargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May/June. 2008.

[2] G. M. Masters, *Renewable and Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, 2004.

[3] N. Khaledi, N. Rezaei, and M. Haghifam, "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 288-295, Jan. 2011.

[4] K. Nekoei, M. M. Farsangi, H. Nezamabai, and K. Y. Lee, "An improved multi-objective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 557-567, Mar. 2013.

[5] A. Soroudi and M. Afrasiab, "Binary PSO-based dynamic multi-objective model for distributed generation planning under uncertainty," *IET Gen., Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 2, pp. 67-78, Jun. 2012.

[6] S. H. Abdi and K. Afshar, "Application of IPSO-Monte Carlo for optimal distributed generation allocation and sizing," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 786-797, Feb. 2013.

[7] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 66-74, Jan. 2012.

[8] W. S. Tan, M. Y. Hassan, H. A. Rahman, and M. P. Abdullah, "Multi-distributed generation planning using hybrid particle swarm optimization-gravitational search algorithm including voltage rise issue," *IET Gener., Transm., Distrib.*, vol. 7, no. 9, pp. 929-942, Jan. 2013.

[9] X. Guan, Z. Xu, and Q. Jia, "Energy-efficient buildings facilitated by microgrid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 243-252, Dec. 2010.

[10] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 673-681, May 2005.

محمد عابدینی در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی و در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی سینا همدان دریافت نمود. دوران خدمت سربازی را در وزارت نیرو به عنوان کارشناس پست سپری نمود و در سال ۱۳۹۴ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه بوعلی سینا گردید. دکتر عابدینی از سال ۱۳۹۳ در دانشکده مهندسی دانشگاه آیت‌الله بروجردی در بروجرد مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در ریزشبه، مدیریت شبکه‌های هوشمند، سیستم‌های توزیعی و بهینه‌سازی می‌باشد.

وحید بهرامی فروتن در سال ۱۳۹۵ مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه بوعلی سینا همدان دریافت نمود. زمینه‌های مورد علاقه اجرایی و پژوهشی دکتر بهرامی فروتن شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، ریزشبه و مدیریت شبکه‌های هوشمند می‌باشد که از جمله این فعالیت‌ها می‌توان به انجام پروژه‌های پژوهشی با استفاده از بورسیه پژوهشی موسسه DAAD آلمان در دانشگاه صنعتی برانشویگ آلمان از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ اشاره نمود.

محمدحسین مرادی در سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۷۳ نام‌برده در گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان به‌عنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید. دکتر مرادی در سال ۱۳۷۷ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه استراسکالاید در گلاسکو اسکاتلند وارد گردید و در سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، ریزشبه، مدلسازی، شبیه‌سازی و کنترل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و پروسه‌های صنعتی، کیفیت توان و اتوماسیون می‌باشد.