

روشی جدید در بارزدایی فرکانسی بهینه در ریزشبهک‌ها با حضور نیروگاه‌های بادی به

کمک شبکه ANFIS

حبیب عموشاهی^۱، رحمت الله هوشمند^۲، امین خدابخشیان^۳ و مجید معظمی^۴

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

amooshahihabib@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

aminkh@eng.ui.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

m_moazzami@eng.ui.ac.ir

چکیده: اهمیت استفاده از انرژی‌های نو باعث افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع شده که علاوه بر مزیت‌های اقتصادی متعدد، تأمین انرژی در وضعیت ایزوله شدن سیستم توزیع را سبب می‌شود. در وضعیت ایزوله شدن ریزشبهک، جهت برقراری تعادل فرکانس و حفظ پروفیل ولتاژ در سطح مجاز نیاز به یک سیستم بارزدایی موثر ضروری است. در این مقاله با بررسی تأثیر حضور نیروگاه بادی و عدم قطعیت تولید آن در ریزشبهک، معیارهای جدیدی برای بارزدایی ارائه شده است. با توجه به فاصله الکتریکی کوتاه در ریزشبهک، ایجاد تعادل توان راکتو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این مبنای روش بارزدایی پیشنهادی از ترکیب معیارهای فرکانسی و ولتاژی استفاده می‌کند. تعیین میزان بارزدایی توسط آنالیز پایداری گذرا انجام شده و بارزدایی به وسیله ANFIS در ریزشبهک اجرا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده مؤثر بودن روش پیشنهادی برای بارزدایی در میکروگرید و حفظ پایداری آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبهک، نیروگاه بادی، بارزدایی، سیستم استنتاج عصبی - فازی.

۱- مقدمه

می‌شود و شبکه‌های توزیع از نقطه نظر مداری به صورت اکتیو در آمده و به ریزشبهک تغییر نام می‌دهند [۱]. از آنجا که ریزشبهک حوزه نسبتاً جدیدی است، استانداردی جامع برای بهره‌برداری، کنترل و حفاظت آن وجود ندارد. استانداردهایی نظیر IEEE 1547 و G59/1 باید بازنگری اساسی شده و برای ریزشبهک‌ها بازنویسی شوند تا مسائل جدید بهره‌برداری، کنترل و حفاظت در آن دیده شود [۲]. از جمله مسائلی که نیاز به بررسی وسیع دارد، مسئله ایزوله شدن و بارزدایی ریزشبهک در وضعیت اضطراری است. وقتی که ریزشبهک از شبکه سراسری قطع می‌شود، بنا به نقطه کار ریزشبهک، فرکانس دچار تغییر

سیستم‌های قدرت مرسوم به طور جدی با مشکلاتی از قبیل کاهش منابع سوخت فسیلی، بازده انرژی پایین و آلاینده‌گی محیط زیست مواجه هستند. با پیدایش زمینه جدید تولید توان به صورت محلی و با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در سطح ولتاژ توزیع، این مشکلات رفع

۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۰۶/۲۸

نام نویسنده مسئول : حبیب عموشاهی

نشانی نویسنده مسئول : ایران - اصفهان - خیابان هزار جریب -

دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی.

برای بهینه کردن بارزدایی می‌توان اهدافی، از جمله: کاهش از دست دادن DG و کاهش بار حذفی، درجه اهمیت بار و منابع تولیدی، کاهش انحراف ولتاژ، پیدا کردن محل مناسب قطع بار به منظور حفظ ولتاژ شین‌های ضعیف و شاخص پایداری ولتاژ به منظور تعیین شین‌های حساس به شکست ولتاژ را در چهارچوب قیدهای بهره‌برداری و امنیت سیستم در نظر گرفت [۷ و ۸]. در مرجع [۹] میزان بار حذفی و سایر پارامترهای بارزدایی، از جمله: تعداد مراحل و تأخیر زمانی بارزدایی برای رله زیر فرکانسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابتکاری تعیین شده است.

در مرجع [۱۰] روش بارزدایی تطبیقی برای یک شبکه صنعتی، به کمک شبکه عصبی پیشنهاد شده است که در آن، آنالیز پایداری گذرا برای آموزش بهتر شبکه، برای کاهش بار حذفی استفاده شده است. به همین منظور، از مدل‌های دینامیکی سیستم استفاده شده است. توان تولیدی، توان مصرفی، نرخ تغییر فرکانس قبل از ایزوله شدن شبکه و نرخ تغییر فرکانس بعد از ایزوله شدن شبکه به عنوان متغیرهای ورودی و میزان بهینه بار حذفی به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده است.

مرجع [۱۱] بارزدایی صحیح و مؤثر را برای سیستم‌هایی که نزدیک محدوده پایداری خود بهره‌برداری می‌شوند، بسیار با اهمیت دانسته است. این مرجع دو روش بارزدایی مبتنی بر سیستم فازی (FIS) و سیستم نرو-فازی (NFLC)^۸ را مقایسه و بارزدایی بر اساس کنترل کننده نرو-فازی را برای بارزدایی بلادرنگ توصیه کرده است. مرجع [۱۲] با اشاره به بهره‌برداری سیستم‌های قدرت امروزی در حاشیه پایداری، حفاظت‌های مرسوم و غیر تطبیقی را در برابر خطاهای ترکیبی سیستم قدرت غیر قابل اعتماد شمرده است. این روش با اشاره به کاهش توان راکتیو در خلال وقوع یک اغتشاش بزرگ، ضرورت توجه به وضعیت ولتاژ علاوه بر وضعیت تغییرات فرکانس را در روش بارزدایی یاد آور شده است. در مرجع [۱۳] روشی برای تجدید نظر در تنظیمات رله‌های خط ارتباطی و بارزدایی به منظور جلوگیری از کاهش تولید یک کارخانه در

خواهد شد. در صورت انحراف فرکانس از میزان مجاز بایسد مقداری از بار شبکه حذف شود. در این ساختار به علت اینرسی پایین ریزشبه، بارزدایی باید سریعتر از سیستم‌های قدرت رایج انجام شود [۱]. همچنین، وجود منابع تولید پراکنده بادی و فتوولتائیک و عدم قطعیت تولید آنها، مطالعات بارزدایی را نسبت به معیارهای رایج در سیستم‌های قدرت دستخوش تغییر می‌کند.

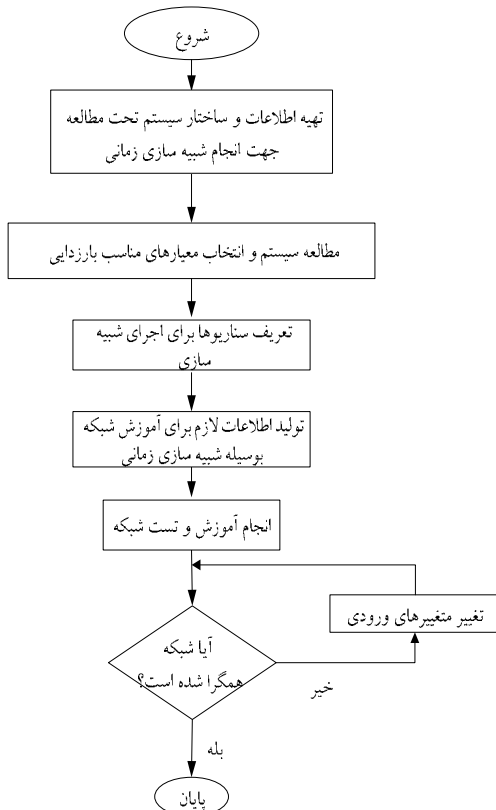
در ریزشبه‌ها برای افزایش اینرسی از ادوات ذخیره انرژی، از جمله باتری‌ها، ابرخازن، چرخ طیار و سیستم‌های ابرسانای ذخیره انرژی مغناطیسی (SMES)^۱ استفاده می‌شود [۱]. برای انجام بارزدایی باید اینرسی ژنراتور سنکرون، مزرعه بادی سرعت ثابت و مزرعه بادی تغذیه دوگانه و سایر ادوات ذخیره انرژی بررسی شوند. همچنین در ریزشبه‌ها به علت کوتاه بودن فواصل الکتریکی و بالا بردن سرعت تعیین پارامترهای معادله نوسان ژنراتور، فرکانس را می‌توان از طریق اندازه‌گیری در شین‌های مرکزی ریزشبه تعیین کرد [۳].

برای بارزدایی در یک سیستم جزیره شده با واحدهای تولید پراکنده می‌توان از اطلاعات فرکانس^۲، نرخ تغییر فرکانس (RoCoF)^۳، رضایت مشتریان در پرداخت هزینه (WTP)^۴ و سابقه بارها^۵ برای بارزدایی استفاده کرد [۴]. در این مرجع سیستم بارزدایی با توجه به قطعیت توان تولیدی سیستم عمل می‌کند و توان واحدهای بادی و فتوولتائیک حذف شده است. همچنین، بارها به صورت PQ ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

به جای استفاده از شاخص‌های مرسوم، برای جلوگیری از (FIDVR)^۶، می‌توان از انحراف انرژی جنبشی موتور القایی که نشانه‌ای از برهم خوردن تعادل توان است، استفاده کرد [۵].

نکته درخور توجه اینکه، منابع تولید انرژی‌های نو عامل انحراف فرکانسی و ایجاد نوسان‌های نامطلوب در سیستم هستند. به همین جهت، ریسک عملکرد اشتباه رله‌های فرکانسی تنظیم شده بر اساس معیار df/dt در ریزشبه بیشتر است [۶].

شبهه‌سازی می‌شود. در گام بعدی مطالعات پایداری گذرا برای تعیین معیارهای مناسب بارزدایی انجام می‌شود. در ادامه سناریوهای مختلفی برای ایجاد پایگاه داده لازم برای آموزش شبکه بررسی و شبیه‌سازی می‌شود. این سناریوها باید وضعیت‌های متفاوتی را که احتمال رخداد آنها در سیستم وجود دارد، پوشش دهد. پس از آن با انجام آنالیز پایداری گذرا، منبع اطلاعاتی برای آموزش شبکه فراهم می‌شود. تعداد اطلاعات پایگاه داده باید با نوع شبکه مورد نظر مطابقت داشته باشد. باید توجه داشته باشیم که در ریزش شبکه به علت محدودیت سناریوها نمی‌توان بسادگی از شبکه عصبی استفاده کرد. بنابراین، از سیستم استنتاج عصبی- فازی استفاده خواهد شد. با انجام آموزش، شبکه ANFIS آزمایش می‌شود تا بهترین ورودی‌ها برای آموزش شبکه انتخاب شوند. برای مثال، استفاده از ورودی ولتاژ در شبکه ANFIS تاثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت آموزش و انجام بارزدایی بهینه خواهد داشت.



شکل (۱): فلوچارت روند طراحی بارزدایی

هنگام وضعیت اضطراری شبکه سراسری، ارائه شده است. بارهای حساس به ولتاژ در هنگام وقوع خطای شدید و کمبود ولتاژ، قطع می‌شوند.

در این مقاله یک روش بارزدایی فرکانسی با استفاده از معیارهای ترکیبی ولتاژی و فرکانسی با توجه به عدم قطعیت منابع بادی برای یک ریزش شبکه ارائه شده است. با توجه به ساختار ویژه میکروگرید و تاثیر پذیری همزمان فرکانس و ولتاژ آن در وضعیت وقوع اغتشاش، بارها به صورت دینامیکی مدل سازی شده‌اند تا تاثیرات تغییر ولتاژ با دقت بیشتری لحاظ شود. در این ساختار از شبکه ANFIS برای تعیین کل بارزدایی لازم استفاده شده است. در این مطالعه توان دریافتی از شبکه بالادست، توان تولیدی منابع پراکنده میکروگرید، توان کل بار میکروگرید، سرعت باد، فرکانس مینیمم و ولتاژ مینیمم سیستم در وضعیت اغتشاش به عنوان ورودی‌های شبکه ANFIS و کل بارزدایی به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. پایگاه داده مورد استفاده برای ANFIS از آنالیز حالت گذرای ریزش شبکه برای وضعیت اغتشاش مختلف در وضعیت بارگذاری متفاوت آن در بازه کاری روزانه حاصل شده است. سناریوهای اغتشاش مورد بررسی شامل قطع شبکه بالا دست، کاهش توان تولیدی منابع تولید انرژی، خروج واحدهای تولید پراکنده و تغییر سرعت باد هستند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد صحیح و مؤثر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در این مقاله ابتدا معیارهای بارزدایی استفاده شده و الگوریتم بارزدایی ارائه می‌شود. پس از آن با معرفی سیستم آزمایش به بررسی تاثیر نیروگاه بادی در ریزش شبکه، تعریف سناریوها برای ایجاد پایگاه اطلاعاتی برای آموزش ANFIS، آزمایش ANFIS و بررسی معیار ولتاژ در آموزش ANFIS پرداخته می‌شود. در ادامه، روش پیشنهادی شبیه‌سازی شده و اثر تنظیم مراحل بارزدایی بررسی و در نهایت، نتایج حاصل از این مطالعه بیان شده است.

۲- روش بارزدایی پیشنهادی برای ریزش شبکه:

روند الگوریتم بارزدایی پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در ابتدا اطلاعات ساختار سیستم بررسی و

۲-۱- معیارهای بارزدایی برای ریزشبه

همان گونه که بیان گردید، معیارها و روش‌های مختلفی برای بارزدایی استفاده می‌شود. روش‌های بارزدایی به دو دسته روش‌های فرکانسی و ولتاژی تقسیم می‌شود. بارزدایی فرکانسی مرسوم‌ترین روش بارزدایی است و نرخ تغییرات فرکانس پرکاربردترین معیار آن است. علاوه بر آن، در طی یک اغتشاش بزرگ در سیستم، علاوه بر کمبود توان اکتیو، توان راکتیو نیز کاهش یافته، پایداری ولتاژ و فرکانس به خطر می‌افتد [۱۲]. بنابراین، بارزدایی ترکیبی بر حسب معیارهای فرکانسی و ولتاژی، راهکار مناسبی برای ارائه یک روش بارزدایی مؤثر است. با توجه به وضعیت فنی حاکم بر ریزشبه، در تعیین معیارهای بارزدایی توجه به دو نکته زیر اساسی است:

۱- در ریزشبه به علت اینرسی کم و متغیر ناشی از وجود منابع تولید پراکنده، از جمله نیروگاه بادی، نوسان‌های فرکانس بیشتر خواهد بود.

۲- در ریزشبه به علت نزدیکی تولید و بار در سیستم فشار ضعیف و فشار متوسط، فاصله الکتریکی شین‌ها کوتاه است.

با توجه به این دو نکته، استفاده از معیار df/dt در سیستمی که در آن نیروگاه بادی وجود دارد، نامناسب است [۵]. همچنین میزان تولید نیروگاه بادی که ناشی از سرعت وزش باد است، بر رفتار فرکانسی ریزشبه تأثیر دارد و هر چه اینرسی سیستم کمتر باشد، این تأثیر بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر، برخی از واحدهای CHP به علت عملکرد بد پمپ آب و روغن بر اثر نوسان ولتاژ ناشی از خطا، قطع می‌شوند [۱۳]. بنابراین، اضافه شدن معیار ولتاژ در کنار معیار فرکانس به پایداری هر چه بهتر سیستم کمک می‌کند. با توجه به این نکات، فرکانس، ولتاژ و سرعت باد، معیارهای مناسبی برای بارزدایی در ریزشبه خواهند بود.

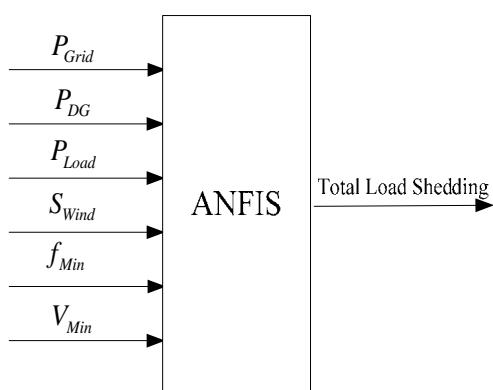
۲-۲- بارزدایی بر اساس شبکه ANFIS

برای اجرای بارزدایی از شبکه ANFIS استفاده می‌شود. اطلاعات ورودی شبکه از طریق کنترل‌کننده مرکزی

(Central Control) در ریزشبه دریافت و میزان کل بارزدایی توسط ANFIS تعیین می‌شود. سپس دستورهای لازم برای قطع بارها مطابق با فهرست حق تقدم دینامیکی به بریکرهای بارهای مذکور به وسیله واحد هماهنگی حفاظتی (Protection Coordination Module) ارسال می‌شود [۱].

ساختار شبکه ANFIS دارای شش ورودی شامل توان دریافتی از شبکه بالا دست (P_{Grid})، توان تولیدی منابع تولید پراکنده (P_{DG})، بار ریزشبه (P_{Load})، سرعت باد (S_{Wind})، حداقل فرکانس (f_{Min}) و حداقل ولتاژ (V_{Min}) است. شکل (۲) شبکه ANFIS مورد استفاده را نشان می‌دهد.

برای آموزش شبکه ANFIS باید با تعریف سناریوهای مناسب، پایگاه اطلاعاتی مناسبی فراهم شود. در ادامه، نحوه چگونگی تشکیل پایگاه داده مورد استفاده بیان شده است.



شکل (۲): ساختار شماییک شبکه ANFIS مورد استفاده

۲-۳- پایگاه داده مورد استفاده در روش

پیشنهادی

در صورت وجود یک سیستم کنترل مناسب و استفاده از یک روش بارزدایی مؤثر، ریزشبه‌ها در مواقع قطع ارتباط از شبکه بالا دست می‌توانند پایداری خود را حفظ و از خاموشی کامل جلوگیری کنند. در سیستم‌های قدرت، خروج واحدهای تولیدی یا خط انتقال با افت فرکانس

به طور کلی، پیاده‌سازی بارزدایی در تعداد مراحل بیشتر و بار حذفی کمتر در هر مرحله نسبت به بارزدایی در تعداد مراحل کمتر و بار حذفی بیشتر مربوط به هر مرحله، اولویت دارد. به همین علت، بهتر است تنظیمات فرکانس‌های بارزدایی رله‌های فرکانسی خیلی نزدیک به یکدیگر نبوده، دارای یک فاصله منطقی باشند. رعایت این مسئله به علت تأخیر زمانی عملی مربوط به رله‌ها و نیز عملکرد کلیدها و برای جلوگیری از ایجاد تداخل بین مراحل بارزدایی ضروری است.

بر اساس مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، بارزدایی بر اساس سه طرح مختلف زیر صورت می‌گیرد [۱۴]:

۱- کل بار حذفی و نیز مقدار بار حذفی در هر مرحله ثابت است؛

۲- کل بار حذفی ثابت، ولی باری که در هر مرحله حذف می‌گردد، متغیر است؛

۳- کل بار حذفی و نیز بار هر مرحله متناسب با مقدار کاهش فرکانس تغییر می‌کند.

روش سوم با توجه به قابلیت انعطاف بالاتر و امکان انجام بارزدایی بر اساس شدت اغتشاش، از اولویت بالاتری برخوردار است.

۳- سیستم تحت مطالعه

شکل (۳) ساختار یک شبکه توزیع فشار متوسط با چندین منبع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. این شبکه از سوی انجمن بین‌المللی سیستم‌های بزرگ الکتریکی (CIGRE) به عنوان شبکه تست برای بررسی اتصال منابع پراکنده معرفی شده است [۱۵]. ولتاژ نامی شبکه فشار متوسط ۲۰ کیلوولت است که از طریق پست فوق توزیع ۱۱۰ کیلوولت تغذیه می‌شود. بیشتر اتصالات شبکه به صورت کابل بوده، ولی برخی را نیز خطوط هوایی تشکیل می‌دهند. متصل کننده DC بین دو زیرسیستم اختیاری بوده و هدف زیرسیستم ۲ برای مطالعه آثار این نوع اتصال است.

همراه است. در این حالت، سیستم به وسیله بارزدایی بارهای غیر ضروری، پایداری خود را حفظ می‌کند.

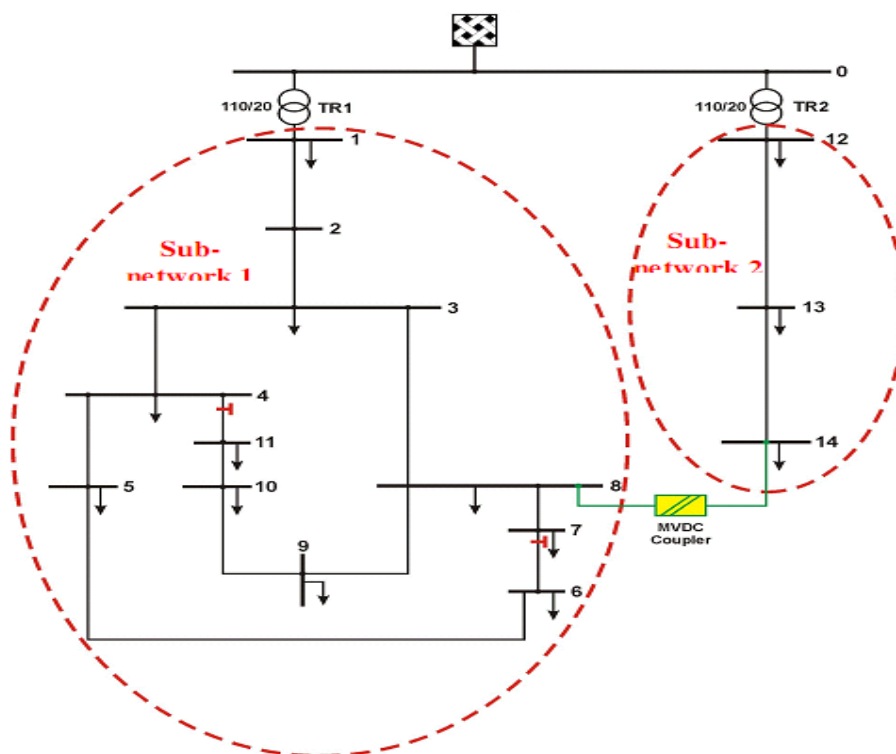
در ریزش‌بکه‌ها مهمترین سناریویی که در آن بارزدایی انجام می‌شود، قطع شدن شبکه بالا دست خواهد بود. پایگاه داده مورد استفاده برای ANFIS از آنالیز حالت گذرای ریزش‌بکه برای وضعیت اغتشاش مختلف در وضعیت بارگذاری متفاوت حاصل شده است. در این ساختار سناریوهای اغتشاش مورد بررسی شامل قطع شبکه بالا دست، کاهش توان تولیدی منابع تولید انرژی و خروج واحدهای تولید پراکنده است. با توجه به مباحث صورت گرفته در بخش دو سناریوهای یاد شده در سرعت‌های مختلف باد بررسی شده‌اند.

۲-۴- تنظیم مراحل بارزدایی

بارزدایی، اساساً در طول چندین مرحله انجام می‌گردد. کل باری که در طول مراحل مختلف بارزدایی باید حذف گردد، بر اساس بدترین حالت قابل پیش‌بینی و با توجه به ماکزیمم مقدار از دست دادن تولید در شبکه تعیین می‌گردد. مقدار مراحل و بار حذفی مربوط به هر مرحله باید به طور مناسب انتخاب گردند. در صورت تنظیم نامناسب فرکانس‌ها و میزان بار حذفی در هر مرحله، عواقب ناخوشایندی مانند بارزدایی بیش از حد در مراحل ابتدایی و ایجاد اضافه فرکانس و یا بارزدایی کم در مراحل اولیه و افت شدید فرکانس غیر قابل اجتناب است. در صورت کاهش شدید فرکانس، رله‌های حفاظت فرکانسی واحدهای تولیدی تریپ می‌دهد که خاموشی‌های گسترده را به دنبال دارد. به طور کلی، تنظیم مراحل بارزدایی فرکانسی که شامل تعداد پله‌ها و فرکانس آستانه بارزدایی است، قوانین کاملاً مشخصی ندارد. انتخاب این پارامترها به شدت به وضعیت ساختاری و فنی سیستم تحت مطالعه و آنالیز پایداری گذرای آن وابسته است. در عین حال، برای تنظیمات مورد نظر سعی می‌شود اصول کلی زیر رعایت شود.

باس‌های شماره ۴ و ۷ تعبیه شده که در حالت عادی باز بوده، با بستن آنها می‌توان سیستم توزیع با ساختار حلقوی را نیز بررسی کرد. مجموع طول خطوط در این زیرسیستم برابر ۱۵ کیلومتر است.

لذا برای اکثر مطالعات می‌توان فقط زیر سیستم ۱ را در نظر گرفت. با رخ دادن یک خطا در سیستم و باز شدن کلید اصلی که در ثانویه ترانس TRI قرار دارد، ریزشبکه به شکل مستقل از سیستم و یا اصطلاحاً به شکل جزیره‌ای به کار خود ادامه خواهد داد. همچنین، دو کلید در نزدیکی



شکل (۳): دیاگرام تک خطی شبکه تست فشار متوسط CIGRE

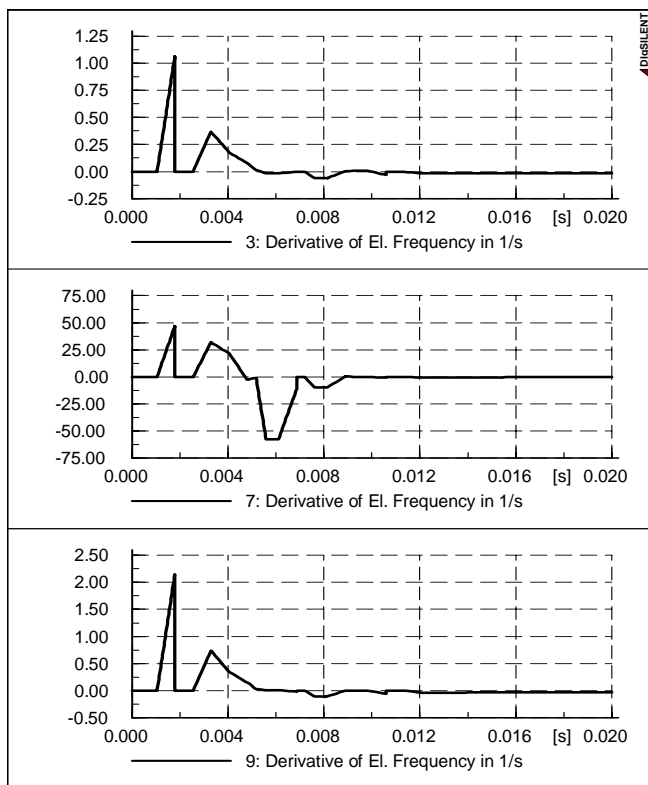
۳، ۷ و ۹ در لحظه اتصال کوتاه نشان داده شده است. این سه شین به نمایندگی از بخش‌های مختلف شبکه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که کل ریزشبکه را پوشش دهد. شین شماره ۷، شینی است که نیروگاه بادی به آن متصل است. شین شماره ۹، یکی از شین‌های مرکزی ریزشبکه و شین شماره ۳، شین نزدیک به شبکه بالا دست است. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که میزان نرخ تغییرات فرکانس به طور قابل ملاحظه‌ای در شین‌ها متفاوت است. بنابراین، نرخ تغییرات فرکانس نمی‌تواند معیار مناسبی برای بارزدایی در ریزشبکه باشد.

۴- نتایج شبیه سازی

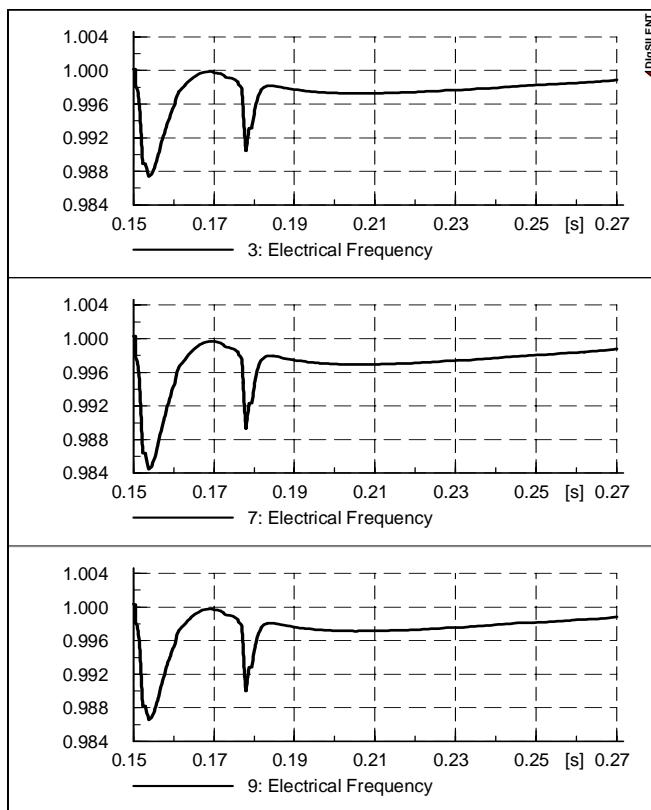
۴-۱- بررسی تأثیر نیروگاه بادی بر ریزشبکه

برای بررسی معیارهای پیشنهاد شده، شبکه معرفی شده در قسمت قبل در نرم‌افزار DIGSILENT شبیه‌سازی کرده و رفتار ریزشبکه بررسی می‌شود. برای بررسی رفتار نیروگاه بادی به طور خاص، از قرار دادن واحدهای تولیدی دیگر صرف نظر شده است [۱۶].

برای این بررسی، اتصال کوتاه سه فاز متقارن مستقیم در ژنراتور القایی نیروگاه بادی متصل به شین شماره ۷ اعمال می‌شود. در شکل (۴) نرخ تغییرات فرکانس شین‌های شماره



شکل (۴): نرخ تغییرات فرکانس شین‌های شماره ۳، ۷ و ۹ در لحظه اتصال کوتاه سه فاز متقارن نیروگاه بادی



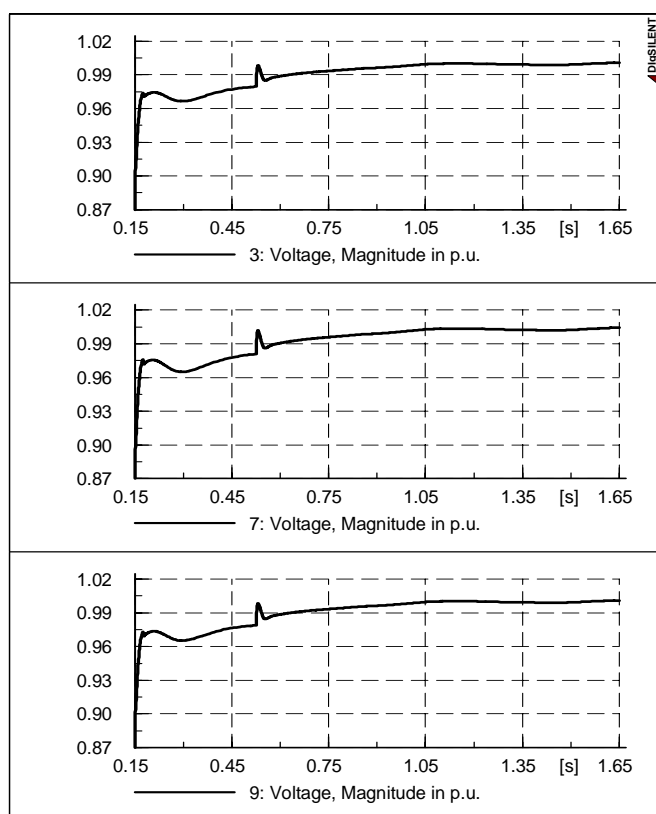
شکل (۵): فرکانس شین‌های ۳، ۷ و ۹ در هنگام رفع خطای سه فاز نیروگاه بادی

فرکانس ریزشبکه است. شکل (۷) و (۸) به ترتیب نرخ تغییر فرکانس و فرکانس شین شماره ۹ را در لحظه رفع اتصال کوتاه، در میزان تولید یک پریونیت (بیشترین تولید) و ۰/۱۱ پریونیت (کمترین تولید) نیروگاه بادی نشان می‌دهد. انتخاب شین شماره ۹ به این علت بوده است که این شین در مرکز ریزشبکه قرار گرفته، مطابق مرجع [۳] برای اندازه‌گیری فرکانس مناسبترین شین خواهد بود. مطابق شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که میزان تولید توان نیروگاه بادی بر روی رفتار فرکانسی ریزشبکه تاثیر خواهد داشت. این تاثیر را می‌توان ناشی از تغییر اینرسی نیروگاه بادی مطابق با سرعت باد دانست.

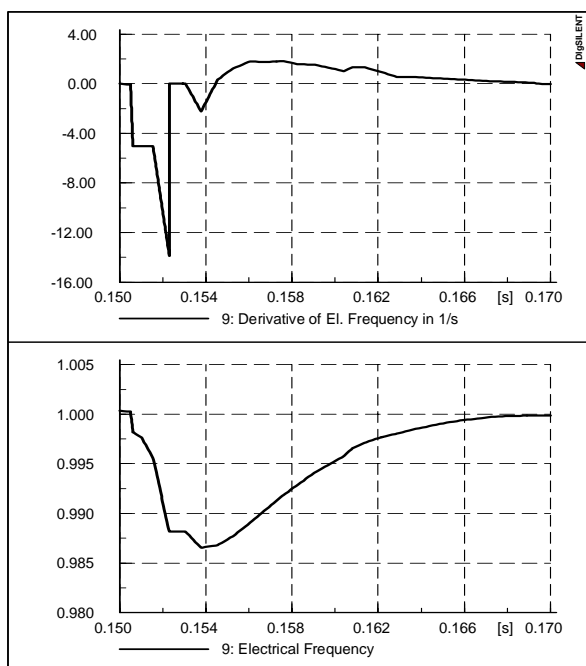
شکل (۵) فرکانس شین‌های شماره ۳، ۷ و ۹ را در لحظه رفع اتصال کوتاه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که فرکانس شین‌ها شباهت بیشتری نسبت به نرخ تغییرات فرکانس به یکدیگر دارند. بنابراین، فرکانس می‌تواند معیار مطمئن‌تری در بارزدایی ریزشبکه‌ها باشد.

در ریزشبکه بهتر است به علت کوتاه بودن فاصله الکتریکی و نوسان‌های ناشی از نیروگاه بادی از معیارهای ولتاژی نیز در بارزدایی استفاده شود. به همین منظور، ولتاژ شین‌های اشاره شده، در لحظه رفع خطا، در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که ولتاژ در شین‌های مختلف تقریباً به شکل یکسان تغییر می‌کند.

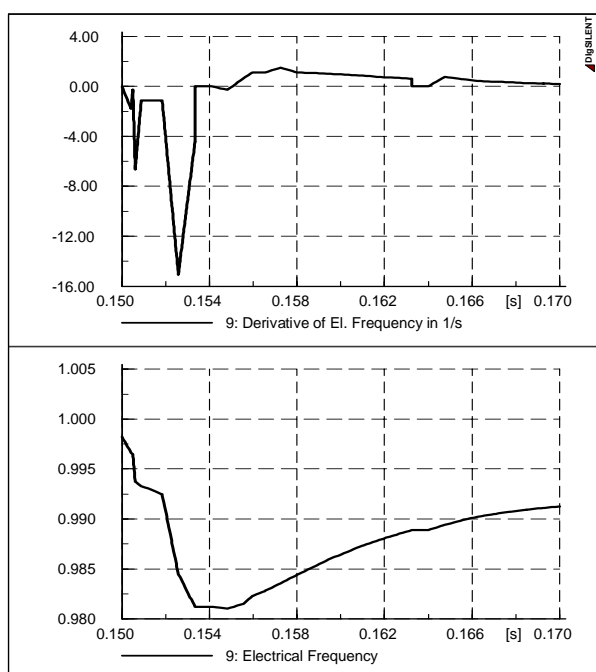
نکته دیگری که باید در حضور نیروگاه بادی باید بررسی شود تاثیر میزان تولید نیروگاه بادی بر روی رفتار



شکل (۶): ولتاژ شین‌های ۳، ۷ و ۹ در هنگام رفع خطای سه فاز نیروگاه بادی



شکل (۷): نرخ تغییر فرکانس و فرکانس شین ۹ در هنگام رفع خطای سه فاز نیروگاه بادی در تولید یک پریونیت

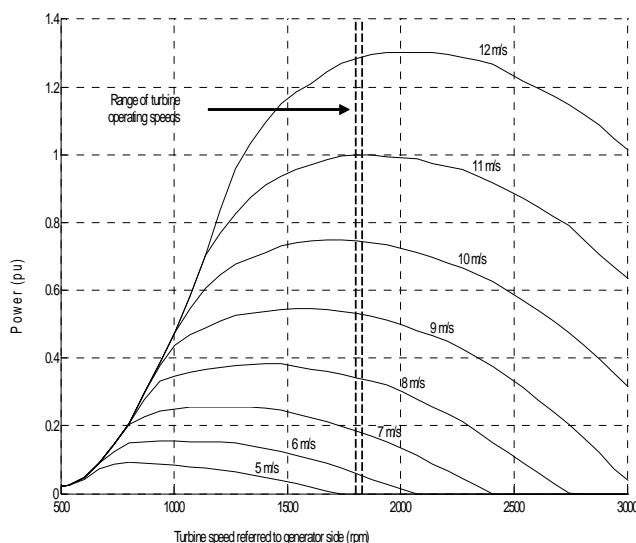


شکل (۸): نرخ تغییر فرکانس و فرکانس شین ۹ در هنگام رفع خطای سه فاز نیروگاه بادی در تولید ۰/۱۱ پریونیت

محدوده فرکانس حالت ماندگار مجاز بین $49/8$ هرتز و $50/2$ هرتز در نظر گرفته شده است. به منظور حذف کمترین میزان بار، بازیابی فرکانس در نقطه پایینی فرکانس مجاز، قابل قبول خواهد بود. شکل (۹) منحنی توان قابل استحصال از نیروگاه بادی را در سرعت‌های باد مختلف نشان می‌دهد.

۴-۲- آنالیز پایداری گذرا در سناریوهای گوناگون

برای به دست آوردن میزان کل بارزدایی لازم، آنالیز پایداری گذرا در نرم‌افزار PSCAD برای سناریوهای بیان شده در ساختار پایگاه داده انجام شده است [۱۷ و ۱۸].



شکل (۹): منحنی توان نیروگاه بادی در سرعت‌های باد مختلف

برای نمونه، سناریوهای مختلف استفاده شده در پایگاه داده ANFIS در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه، در شده در این جدول در میزان توان انتقالی از شبکه بالادست به ریزشبهک است.

جدول (۱): سناریوهای گوناگون قطع شبکه بالادست در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه

	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴	سناریوی ۵	سناریوی ۶	سناریوی ۷	سناریوی ۸	سناریوی ۹	سناریوی ۱۰
P_{load} (kw)	۳۹۳۰	۳۵۳۲	۳۳۱۴	۳۱۵۲	۳۰۵۵	۲۹۴۶	۲۷۵۰	۲۶۸۶	۲۴۸۴	۲۴۳۰
P_{grid} (kw)	۱۷۱۰	۱۳۱۲	۱۰۶۸	۹۱۹	۸۰۹	۷۰۶	۵۰۲	۴۴۶	۲۴۲	۱۹۴
P_{DG} (kw)	۷۵۶	۷۵۲	۷۷۵	۷۶۴	۷۷۴	۷۶۸	۷۸۰	۷۷۵	۷۷۱	۷۶۹
P_{wind} (kw)	۱۴۶۳	۱۴۶۸	۱۴۷۲	۱۴۶۸	۱۴۷۱	۱۴۷۲	۱۴۶۸	۱۴۶۵	۱۴۷۱	۱۴۶۷
f_{min} (Hz)	۴۸/۱۸	۴۸/۵	۴۹/۵	۴۹/۶۶	۴۹/۶۸	۴۹/۷۳	۴۹/۷۵	۴۹/۷۹	۴۹/۸۱	۴۹/۸۴
V_{min} (p.u)	۰/۸۵۲	۰/۸۷۴	۰/۸۸۷	۰/۸۹۷	۰/۹۰۲	۰/۹۰۷	۰/۹۱۵	۰/۹۱۹	۰/۹۲۳	۰/۹۳۲
Total Shed (kw)	۱۵۰۰	۱۱۰۰	۹۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۰	۰

۳-۴- آموزش و تست شبکه ANFIS

روش فازی Takagi-Sugeno بر اساس قوانین if-then است که خروجی هر قانون ترکیبی خطی از متغیرهای ورودی به علاوه یک مقدار ثابت و خروجی نهایی ترکیبی خطی از همه خروجی‌هاست.

فرض کنید پایگاه قوانین شامل دو متغیر ورودی X و Y و یک متغیر خروجی Z و دو قانون فازی به شکل زیر باشد:

$$\begin{cases} \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \\ \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \end{cases} \quad (1)$$

چنانچه گزاره مشاهده شده به صورت زیر باشد:

$$x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B$$

نتیجه استنتاج به شکل:

$$f = \bar{W}_1 f_1 + \bar{W}_2 f_2 \quad (2)$$

خواهد بود که در آن:

$$\bar{W}_1 = \frac{W_1}{W_1 + W_2}, \bar{W}_2 = \frac{W_2}{W_1 + W_2} \quad (3)$$

مددانی از آنها مینیمم گرفته می‌شود و نهایتاً W_i از یکی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$W_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad (۸) \quad \text{روش لارسن}$$

$$W_i = \min[\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)] \quad (۹) \quad \text{روش زاده-ممدانی}$$

لایه سوم: در این لایه مقدار نسبت W_i به W کل (مجموع W_i ها) حساب می‌شود.

$$\bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2}, i = 1, 2 \quad (۱۰)$$

اصطلاحاً W_i ها در این لایه نرمالیزه می‌شوند.

لایه چهارم: در این لایه مقادیر پارامترهای p و q و r بهینه می‌شوند. همچنین، خروجی لایه سوم در ترکیب خطی ورودی ضرب می‌شود.

$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (۱۱)$$

لایه پنجم: در این لایه خروجی نهایی به دست می‌آید:

$$O_i^5 = \text{overall Output} = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (۱۲)$$

در این روش به جز پارامترهای مؤخر دستورها (p و q) و نیز پارامترهای مقدم قوانین فازی (a_i و b_i و c_i) نیز هنگام آموزش تغییر پیدا می‌کنند. پارامترهای مقدم قوانین فازی در واقع همان پارامترهای توابع عضویت هستند.

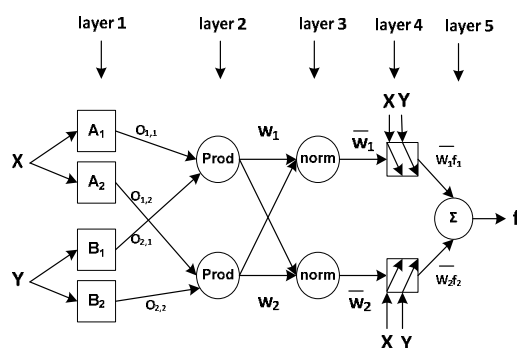
الگوریتم آموزش مورد استفاده شبکه ANFIS ترکیبی از روش مینیمم مربعات و گرادینان نزولی برگشت‌پذیر است. این شبکه دارای تابع عضویت مثلثی شکل برای هر متغیر ورودی است. پس از انجام آموزش شبکه ANFIS به وسیله سناریوهای تعریف شده، برای تست شبکه، چهار سناریو به عنوان نمونه استفاده شده است. این سناریوها در جدول (۲) آورده شده است. برای بررسی نحوه عملکرد شبکه ANFIS و قابلیت آن، سناریوهای انتخابی از وضعیت‌های متفاوت سرعت باد و سطح بارهای مختلف در نظر گرفته شده است.

نتایج آزمایش سناریوها در جدول (۳) آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد مناسب و قابل قبول شبکه در تعیین میزان کل بارحذفی لازم است.

و W_1 و W_2 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} W_1 &= A_1(x) \cdot B_1(y) \\ W_2 &= A_2(x) \cdot B_2(y) \end{aligned} \quad (۴)$$

بنابراین، چنانچه مقادیر P_1 و P_2 و Q_1 و Q_2 و r_1 و r_2 معلوم باشند، خروجی مشخص خواهد بود. شکل (۱۰) بلوک دیاگرام این روش را نشان می‌دهد. در این شکل عملکرد لایه‌های مختلف به شرح زیر است:



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام روش ANFIS

لایه اول: در این لایه درجه عضویت هر ورودی در توابع عضویت مشخص می‌شود.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (۵)$$

که در آن O_i^1 درجه عضویت x در تابع عضویت A_i است. توابع عضویت می‌توانند به صورت زنگوله شکل و با حداقل صفر و حداکثر یک باشند، مانند:

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right\} \quad (۶)$$

و یا:

$$\mu_{A_i} = \exp\left\{-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right\} \quad (۷)$$

با تغییر مقادیر a_i و b_i و c_i شکل تابع زنگوله‌ای تغییر می‌کند. در واقع، هر تابع تکه‌ای مشتق‌پذیر مانند تابع مثلثی شکل و یا دوزنقه شکل می‌توانند به عنوان توابع عضویت استفاده شوند.

لایه دوم: در لایه دوم مقادیر به دست آمده در لایه اول به روش لارسن در هم ضرب می‌شوند و یا به روش زاده-

جدول (۲): سناریوهای تعریف شده برای آزمایش شبکه

	سناریوی (الف)	سناریوی (ب)	سناریوی (ج)	سناریوی (د)
P_{grid} (kw)	۲۴۲	۶۹۴	۱۱۰۴	۱۶۸۳
P_{DG} (kw)	۷۷۱	۷۷۱	۷۵۹	۷۴۸
P_{Load} (kw)	۲۴۸۴	۲۵۶۳	۲۵۹۷	۳۱۴۲
S_{wind} (m/sec)	۱۱	۱۰	۹	۹/۵
f_{min} (Hz)	۴۹/۸۱	۴۹/۳	۴۸/۶۸	۴۸/۱۶
V_{min} (p.u)	۰/۹۲۱	۰/۹۰۷	۰/۸۹۹	۰/۸۶۲
Total Shed (kw)	۰	۵۰۰	۷۰۰	۱۵۰۰

جدول (۳): نتایج آزمایش شبکه با ورودی ولتاژ

	سناریوی (الف)	سناریوی (ب)	سناریوی (ج)	سناریوی (د)
میزان بارزدایی واقعی (kw)	۰	۵۰۰	۷۰۰	۱۵۰۰
خروجی ANFIS (kw)	۲۶	۴۸۱/۶	۶۵۰/۹	۱۴۳۵/۴
قدر مطلق خطا (kw)	۲۶	۱۸/۴	۴۹/۱	۶۴/۶

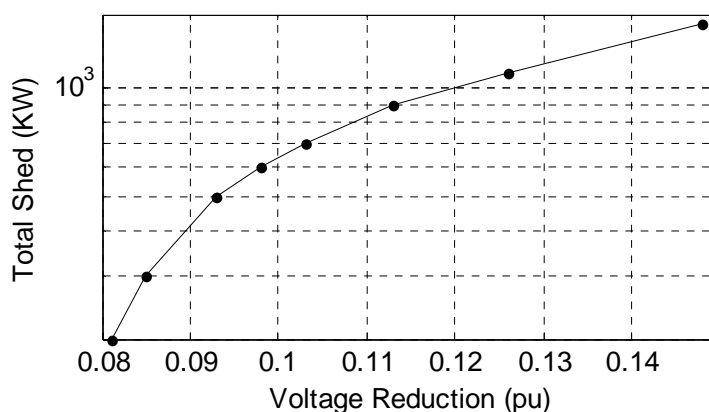
بارزدایی ریز شبکه‌ها علاوه بر ایجاد تعادل در توان اکتیو باید تعادل توان راکتیو نیز مورد توجه قرار گیرد.

برای اثبات مؤثر بودن معیار ولتاژ در بارزدایی، شبکه مورد نظر را بدون ورودی ولتاژ آموزش داده، آن را با سناریوهای ذکر شده در جدول (۲) آزمایش می‌کنیم. نتایج آزمایش در جدول (۴) آورده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از معیار ولتاژ در آموزش شبکه مفید بوده، خطای شبکه را در محاسبه میزان کل بارزدایی کاهش می‌دهد.

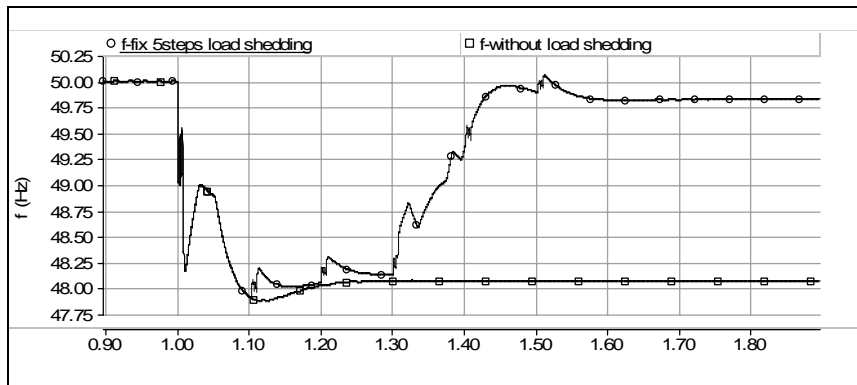
۴-۴- بررسی تأثیر معیار ولتاژ در عملکرد

بارزدایی

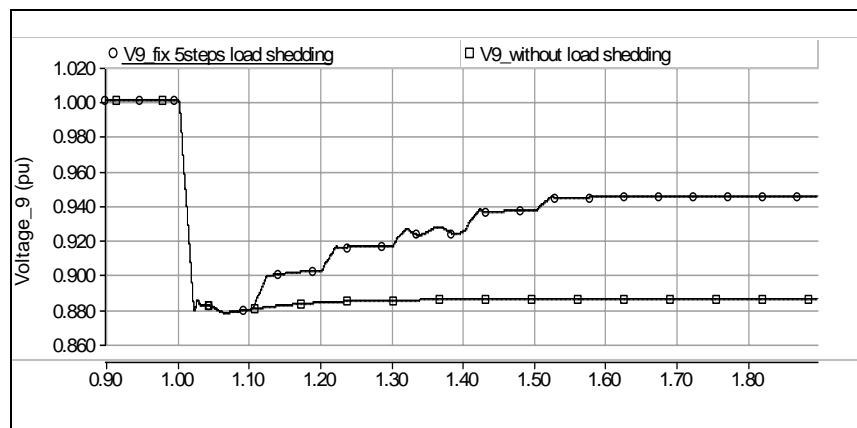
با بررسی جدول (۱) مشاهده می‌شود که کل میزان بارزدایی با میزان افت ولتاژ رابطه مستقیم دارد. این امر در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود. در این شکل میزان کل بارزدایی نسبت به افت ولتاژ رسم شده است. مطابق شکل (۱۱)، عدم تعادل توان اکتیو که متناسب با میزان بارزدایی است، تأثیر مستقیمی روی افت ولتاژ دارد. بنابراین، در



شکل (۱۱): میزان کل بارزدایی نسبت به افت ولتاژ



شکل (۱۲): تغییرات فرکانس ریزش‌بکه بدون بارزدایی و در بارزدایی پنج مرحله‌ای ثابت



شکل (۱۳): ولتاژ شین ۹ ریزش‌بکه بدون بارزدایی و در بارزدایی پنج مرحله‌ای ثابت

جدول (۴): نتایج آزمایش شبکه بدون ورودی ولتاژ

	سناریوی (الف)	سناریوی (ب)	سناریوی (ج)	سناریوی (د)
میزان بارزدایی واقعی (kw)	۰	۵۰۰	۷۰۰	۱۵۰۰
خروجی ANFIS (kw)	۱۲۷/۹	۴۸۲	۶۳۱	۱۳۹۲/۶
قدر مطلق خطا (kw)	۱۲۷/۹	۱۸	۶۹	۱۰۷/۴

(الف)، منفی بودن سود به علت غیرضروری بودن قطع بار است. در سناریوهای (الف) و (ب) سود به دست آمده روش پیشنهادی با در نظر گرفتن ورودی ولتاژ بیشتر است. در سناریوهای (ج) و (د) سود اقتصادی بدون در نظر گرفتن معیار ولتاژ بیشتر است، ولی با اجرای شبیه‌سازی در این حالت‌ها فرکانس به محدوده مجاز بازمی‌گردد نمی‌شود.

به منظور مطالعه اقتصادی، قیمت هر کیلووات انرژی الکتریکی ۰/۰۶ دلار در نظر گرفته شده است. سود ناشی از استفاده از روش پیشنهادی در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول، با استفاده از جداول (۳) و (۴)، سود ناشی از میزان کاهش قطع بار نسبت به میزان بارزدایی واقعی، برحسب دلار محاسبه شده است. در سناریوی

جدول (۵): سود اقتصادی استفاده از ANFIS، ناشی از کاهش قطع بار

سود اقتصادی بر حسب دلار	سناریوی (الف)	سناریوی (ب)	سناریوی (ج)	سناریوی (د)
با ورودی ولتاژ	-۱/۵۶	۱/۱۰۴	۲/۹۴۶	۳/۸۷۶
بدون ورودی ولتاژ	-۷/۶۷۴	۱/۰۸	۴/۱۴	۶/۴۴۴

۴-۵- تنظیم مراحل بارزدایی

با به دست آوردن میزان کل بارزدایی باید برای اجرای آن تحت چند مرحله تصمیم‌گیری کرد، زیرا هنگام قطع شدن شبکه بالا دست، میزان تولید توان از دست رفته در بدترین وضعیت، حدود نصف بار ریزشبكة است. بنابراین، بارزدایی در یک مرحله ریزشبكة را دچار اختلال می‌کند. با توجه به نکات بیان شده در بخش‌های قبلی، تنظیمات فرکانسی و میزان بار حذفی هر مرحله و سایر پارامترهای لازم با توجه به استنباط سیستم از آنالیز پایداری گذرای ریزشبكة در جدول (۶) آورده شده است. کوچک بودن زمان تأخیر به دلیل اینرسی کم ریزشبكة است.

استفاده از یک فهرست حق تقدم دینامیکی شینه‌ها با توجه به کمترین مقدار ولتاژ می‌تواند معیار مناسبی برای تعیین محل بارزدایی و بازیابی بهتر ولتاژ ریزشبكة باشد. به این ترتیب، مشکل به هم خوردن تعادل توان راکتیو نیز قابل حل خواهد بود. در تعیین فهرست حق تقدم علاوه بر مسائل فنی مانند قطع بار از شینه‌های با کمترین مقدار ولتاژ به منظور بازیابی هرچه بهتر ولتاژ شینه‌ها، مسائل اقتصادی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. این مسأله در مرجع [۴] به طور مفصل بحث شده است. البته، مسائل فنی تا بازیابی ولتاژ به محدوده مجاز از اهمیت بیشتری برخوردار است.

جدول (۶): تنظیمات مراحل بارزدایی فرکانسی

مراحل بارزدایی	فرکانس آستانه بارزدایی (HZ)	میزان بارزدایی (KW)	تاخیر زمانی رله (Sec)
۱	۴۹/۳	۲۰۰	۰/۱
۲	۴۹/۱	۳۰۰	۰/۱
۳	۴۸/۹	۳۰۰	۰/۱
۴	۴۸/۷	۳۰۰	۰/۱
۵	۴۸/۳	۴۰۰	۰/۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای بارزدایی در ریزشبكة ارائه شده است. این ساختار با بررسی تفاوت ریزشبكة‌ها و سیستم‌های قدرت مرسوم، معیارهای جدید بارزدایی را پیشنهاد می‌دهد. روش پیشنهادی از ترکیب معیارهای فرکانسی و ولتاژی و تأثیر نیروگاه بادی بر ریزشبكة، استفاده می‌کند. با اجرای آنالیز پایداری گذرا بر روی ریزشبكة، صحت معیارهای بارزدایی ارائه شده تأیید شده و به کمک ANFIS، بارزدایی اجرا می‌شود. همچنین، تأثیر معیار ولتاژ در آموزش شبکه ANFIS بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به بازیابی همزمان ولتاژ و فرکانس را در زمان مناسب با دینامیک پاسخ قابل قبول بازیابی کند.

فرکانس و ولتاژ ریزشبكة بدون بارزدایی و بارزدایی پنج مرحله‌ای ثابت برای بدترین حالت ریزشبكة؛ یعنی سناریوی (د) به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس از میزان حدود ۴۸ هرتز به محدوده مجاز بازیابی شده و همچنین، ولتاژ از میزان ۰/۸۸ پریونیت بازیابی شده و به حدود ۰/۹۵ پریونیت رسیده است.

نتایج شبیه‌سازی بیانگر توانایی روش پیشنهادی برای بارزدایی موثر در ریزشبكة است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند که روش بارزدایی توانسته است به صورت همزمان ولتاژ و فرکانس را در زمان مناسب با دینامیک پاسخ قابل قبول بازیابی کند.

مراجع

- Load Shedding for an Industrial Cogeneration Facility”, Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE.
- [11] A. M.A. Haidar, A. Mohamed, A. Hussain, "Vulnerability control of large scale interconnected power system using neuro-fuzzy load shedding approach", Expert Systems with Applications, Vol. 37, pp. 3171–3176, 2010.
- [12] A. Saffarian, M. Sanaye-Pasand, "Enhancement of Power System Stability Using Adaptive Combinational Load Shedding Methods", IEEE Trans. on Power system, this article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.
- [13] Ch.Sh. Chen, Ch.T. Hsu, Y.D. Lee, "Protective Relay Settings of Tie Line Tripping and Load Shedding for an Integrated Steelmaking Cogeneration System", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 46, No. 1, pp. 38-45, Jan./Feb.2010.
- [14] T. Tomsic, G. Verbic, "Revision of the Underfrequency Load-Shedding Scheme of the Slovenian Power System", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp. 1782–1787, June 2005.
- [15] K. Rudion, A. Orths, Z. A. Styczynski, K. Strunz, "Design of Benchmark of Medium Voltage Distribution Network with High Penetration of Dispersed Generation", IEEE Power Eng. Soc. Meeting, Montreal, QC, Canada, June2006.
- [16] More information about digsilent, available in: www.digsilent.de
- [17] F. D. Kanellos and N. D. Hatziargyriou, "Control of Variable Speed Wind Turbines in Islanded Mode of Operation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, June 2008.
- [18] More information about PSCAD, available in: www.pscad.com
- [1] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley, "Micro grids and Active Distribution Network", London: The Institution of Engineering and Technology (IET), ISBN: 978-1-84919-014-5, 2009.
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources into Electric Power Systems, IEEE Std. 1547TM, Jun. 2003.
- [3] V. Terzija, M. Kayikci, D. Cal, "Power Imbalance Estimation Distribution Networks With Renewable Energy Resources", 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, Paper 0680, June 2009.
- [4] P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, "Under frequency Load Shedding for an Islanded Distribution System With Distributed Generators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, pp. 911-918, Apr. 2010.
- [5] H. Bai, V. Ajarapu, "A Novel Online Load Shedding Strategy for Mitigating Fault-Induced Delayed Voltage Recovery", IEEE Trans. on Power system, Vol. 26, No. 1, Feb. 2011.
- [6] H. Bevrani, G. Ledwich, J. J. Ford, "On the Use of df/dt in Power System Emergency Control", Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES2009.
- [7] R. V. Fernandes, S. A. B. de Almeida, F. P. M. Barbosa, R. Pestana, "Load Shedding-Coordination between the Portuguese Transmission Grid and the Distribution Grid with Minimization of Loss of Distributed Generation", Paper accepted for presentation at 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania.
- [8] M. H. Moradi, M. Abedini, "Optimal Load Shedding Approach in Distribution Systems for Improved Voltage Stability", 4th International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO), pp. 198-200, Shah Alam, Selangor, Malaysia: 23-24 June 2010.
- [9] Y.Y. Hong, Sh. F. Wei, "Multiobjective Under frequency Load Shedding in an Autonomous System Using Hierarchical Genetic Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1355-1362, July 2010.
- [10] Ch. T. Hsu, H. J. Chuang, Ch.Sh. Chen, "Artificial Neural Network Based Adaptive

زیر نویس‌ها

-
- 1- Superconducting Magnetic Energy Storage
 - 2- Frequency Information
 - 3- Rate of Change of Frequency

- 4- Customers' Willingness to Pay
- 5- Loads Histories
- 6- Fault-Induced Delayed Voltage Recovery
- 7- Fuzzy Inference System
- 8- Neuro-Fuzzy Logic Controller