

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در طراحی یک کنترل کننده هوشمند فرکانس برای یک ریزشبکه جزیره‌ای

فرشید حبیبی، حسن بیورانی و جمال مشتاق

خورشیدی، میکروتوربین‌های گازی، سلول‌های سوختی و ... به کمک سیستم‌های قدرت می‌آیند [۳].

با پدیدار شدن منابع تولید پراکنده، چندین مشکل از جمله نگهداری و محافظت منابع، نحوه مشارکت این منابع در تنظیم پارامترهای اساسی شبکه همچون فرکانس و ولتاژ و نحوه مبادله توان میان شبکه سراسری و منابع تولید پراکنده و ... ظاهر گردید. برای حل این مشکلات و در نظر گرفتن این منابع و بارهای محلی به صورت مجتمع و یکپارچه، در سال ۱۹۹۸ توسط مؤسسه CERT^۱ مفهوم ریزشبکه‌ها^۲ (MG) برای اولین بار در سیستم‌های قدرت مدرن معرفی گردید. بر اساس این معرفی، ریزشبکه‌ها شبکه‌های قدرت کوچکی بوده که از چندین منبع تولید پراکنده و بارهای محلی تشکیل شده‌اند. ریزشبکه‌ها در حالت عادی به شبکه سراسری متصل بوده و در حالت‌های اضطراری، بنا به رخداد اغتشاش‌های سنگین از شبکه اصلی جدا شده و می‌توانند بارهای حساس و مهم محلی را به تنهایی تغذیه کنند [۴].

افزایش تعداد ریزشبکه‌ها در سیستم‌های قدرت، سبب تغییر قوانین بنیادی در این سیستم‌ها شده و باعث می‌شوند که منابع تولید در کل سیستم پخش شوند. همین مسئله سبب می‌شود که بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن شبکه‌های قدرت افزوده شده و در نتیجه پاسخ مناسب کنترل کننده‌های کلاسیک را مثل قبل شاهد نباشیم. کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی بیشترین کاربرد را در سیستم‌های قدرت دارا می‌باشند، چون که دارای ساختاری ساده و مقرون به صرفه هستند و در سیستم‌های قدرت به این کنترل کننده‌ها، بیش از هر کنترل کننده دیگری اعتماد وجود دارد. اما مشکل این کنترل کننده‌ها این بوده که ضرایب کنترلی بر اساس شرایط خطی و نقطه کار سیستم، توسط تکنسین‌ها بر اساس میزان شناخت و تجربه آنها، برای یک بار تنظیم شده و در سیستم قرار می‌گیرند. اگر شرایط کار نامی عوض شود یا به دلیل وقوع اغتشاش شرایط خطی سیستم عوض شود، مقادیر در نظر گرفته شده برای این کنترل کننده‌ها از این به بعد مقادیری بهینه نخواهند بود و همان پاسخ مناسب قبل را نخواهند داشت. راه حل ممکن که هم از این کنترل کننده‌های مرسوم و قابل اعتماد استفاده شود و هم مشکل آنها را نیز به نوعی بر طرف کند، این است که ضرایب کنترلی بسته به تغییرات حادثه در سیستم، به‌روز و بهینه شوند [۵].

در این مقاله برای هوشمندسازی یک کنترل کننده PI که در امر کنترل ثانویه فرکانس یک ریزشبکه جدا از شبکه سراسری به کار گرفته شده است، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از قوی‌ترین و پرکاربردترین ابزار در بهینه‌سازی و هوشمندسازی بوده که در این مقاله یکی دیگر از توانایی‌های این شبکه‌ها

چکیده: افزایش نیاز به انرژی الکتریکی، کمبود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌ها در رابطه با مسایل زیست‌محیطی، سبب ورود هرچه بیشتر منابع جدید از جمله منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر انرژی در سیستم‌های قدرت مدرن شده است. ریزشبکه‌ها به عنوان یکی از جدیدترین مفاهیم در سیستم‌های قدرت از چندین منبع تولید کوچک و بارهای الکتریکی محلی تشکیل شده‌اند. با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن سیستم‌های قدرت افزوده شده و سبب می‌شود که کنترل کننده‌های مرسوم و غیر منعطف، کارایی مناسبی را در بازه وسیعی از نقاط کار نشان ندهند. از این رو احتیاج به روش‌های کنترلی هوشمندتر و مناسب‌تر بیش از پیش احساس می‌شود. در این مقاله، شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارها در فرایندهای بهینه‌سازی و هوشمندسازی سیستم‌ها به کار گرفته شده است تا ضرایب یک کنترل کننده کلاسیک تناسبی-انتگرالی (PI) را به صورت خودکار تنظیم و بهینه نماید. کنترل کننده PI، در حلقه ثانویه کنترل فرکانس یک ریزشبکه جزیره‌ای گمارده شده است. عملکرد مناسب و بهینه روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کلاسیک در طی شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده می‌شود.

کلید واژه: تنظیم آنلاین، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ریزشبکه، کنترل ثانویه فرکانس.

۱- مقدمه

مطابق با افزایش روزافزون مصرف انرژی در جهان، سیستم‌های قدرت مرسوم با مسایلی همچون نگرانی‌های زیست‌محیطی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید، محدودیت‌های موجود در احداث خطوط انتقال/ توزیع و کمبود سوخت‌های فسیلی مواجه شده‌اند. به منظور غلبه بر این مشکلات، افزایش قابلیت اطمینان در سرویس دهی به مشتریان و کاستن تراکم و تلفات در خطوط توزیع و انتقال، منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر انرژی به عنوان گزینه‌ای جدید و مناسب به سیستم‌های قدرت مدرن معرفی شدند [۱] و [۲].

منابع تولید پراکنده، منابعی برای تولید انرژی الکتریکی با توانی کمتر از ۱۰ مگاوات هستند که اغلب در سمت توزیع یا فوق توزیع به سیستم‌های قدرت مرسوم وصل شده و در تغذیه بارها به آنها یاری می‌رسانند. انرژی اولیه در این منابع، منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر همانند باد، خورشید و گرمایی زمین می‌باشند که در ساختارهای توربین‌های بادی، سلول‌های

این مقاله در تاریخ ۱ خرداد ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۲۴ بهمن ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد. این تحقیق توسط دانشگاه کردستان پشتیبانی شده است.

فرشید حبیبی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه کردستان، سنندج، (email: habibi.farshid@gmail.com)

حسن بیورانی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه کردستان، سنندج، (email: bevrani@ieee.org)

جمال مشتاق، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه کردستان، سنندج، (email: j.moshtagh@uok.ac.ir)

1. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions

2. Microgrid

ریزشبکه‌ها همانند میکروتوبین‌ها، سلول‌های سوختی و خورشیدی، منابع ذخیره‌کننده انرژی و بارها جهت تحلیل یا شبیه‌سازی آنها در [۱۲] ذکر شده است.

استراتژی‌های کنترلی در ریزشبه‌ها بایستی به صورتی باشند که هدف اساسی این شبکه‌ها در ادامه کار در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه سراسری را تأمین کنند. به همین منظور دو ساختار کلی کنترلی بسته به شرایط کاری ریزشبه‌ها در نظر گرفته شده است. در حالتی که ریزشبه به شبکه سراسری قدرت وصل باشد، پایداری پارامترهای اساسی شبکه همچون ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی تأمین شده و ریزشبه به عنوان یک عنصر کمکی در تأمین بارهای مشترک محسوب می‌شود. به این مد کاری، PQ گفته می‌شود که بیانگر این است که ریزشبه برای تحویل توان‌های حقیقی و موهومی ثابت کنترل می‌شود. در حالت قطع، تنظیم پارامترهای اساسی سیستم به عهده خود ریزشبه بوده و بایستی غیر از این مورد، بارهای خود یا حداقل بارهای حساس و مهم را تغذیه نماید. به این مد کاری، VSI گفته می‌شود [۱۳] و [۱۴].

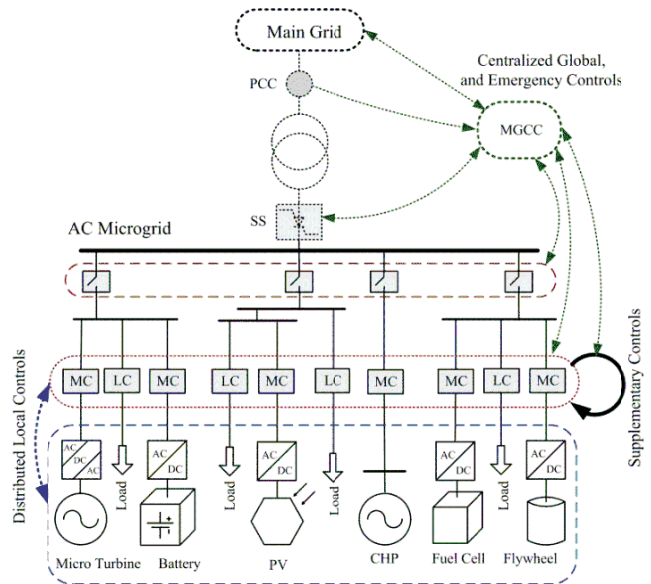
پس برای اعمال این روش‌های کنترلی به یک سری کنترل‌کننده، روی هر کدام از ریزمنابع^۲ (MC) و روی بارهای الکتریکی^۳ (LC) نیاز است. همچنین برای ارتباط میان ریزشبه و شبکه اصلی قدرت، وجود یک کنترل‌کننده مرکزی^۴ (MGCC) که به صورت هم‌زمان به پردازش اطلاعات دریافتی از ریزشبه و شبکه اصلی بپردازد و بر مبنای این اطلاعات برای حالات کاری ریزشبه و ریزمنابع تصمیم‌گیری کند، ضروری است.

۳- سیستم آزمون

در بسیاری از طرح‌های کنترلی که برای حفظ حالت پایداری ریزشبه‌ها در نظر می‌گیرند، حالت قطع یا جزیره‌ای در مقایسه با حالت وصل به شبکه از اهمیت بالاتری برخوردار است. از این رو برای آزمون روش کنترلی پیشنهادی یک ریزشبه منفک از سیستم اصلی قدرت به عنوان سیستم آزمون در نظر گرفته شده که در شکل ۲ نشان داده شده است. ریزشبه آزمون شامل یک ژنراتور مرسوم دیزلی^۵ (DEG)، یک پانل خورشیدی^۶ (PV)، یک توربین بادی^۷ (WTG)، یک سیستم سلول سوختی^۸ (FC) و دو منبع ذخیره‌کننده انرژی^۹ (BESS و FESS) می‌باشد. همان طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، ریزمنابع از طریق واسطه‌های الکترونیک قدرت همانند کانورترها و اینورترها به شبکه اصلی و بارها متصل می‌شوند [۱۵] و [۱۶].

مطابق با مطالب ذکر شده در بخش‌های قبلی، با توجه به تمرکز این مقاله به مطالعه پایداری فرکانسی سیستم یک مدل ساده‌شده از پاسخ فرکانسی سیستم برای تحلیل ساده‌تر از نحوه رفتار آن در مقابل اغتشاشات مختلف در نظر گرفته شده است که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای استفاده‌شده در جدول ۱ آمده است [۱۵] و [۱۶].

2. Microsource Controller
3. Load Controller
4. Microgrid Central Controller
5. Diesel Energy Generator
6. Photovoltaic
7. Wind Turbine Generator
8. Fuel Cell
9. Battery Energy Storage System
10. Flywheel Energy Storage System



شکل ۱: ساختار کلی ریزشبه‌ها و استراتژی‌های کنترلی در آن [۷].

در تنظیم آنلاین پارامترهای کنترلی بررسی می‌شود.

عملکرد مناسب و بهینه ساختار پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم در طی چندین شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد. توانایی مناسب شبکه‌های عصبی مصنوعی در به روز رسانی پارامترهای کنترلی از یک طرف و عدم انجام این کار در کارهای گذشته، هدف اصلی این تحقیق بوده است.

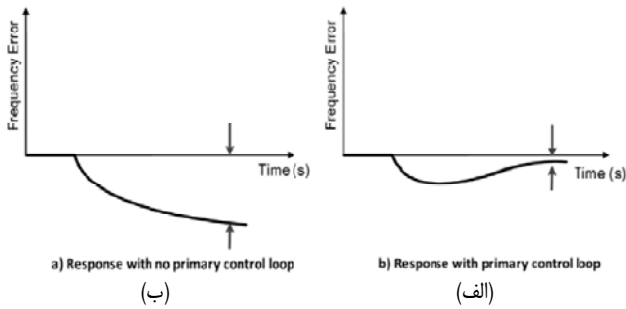
۲- ساختار کلی ریزشبه‌ها و استراتژی‌های کنترلی موجود در آن

ریزشبه‌ها از دسته‌ای از منابع تولید پراکنده و بارهای محلی تشکیل شده‌اند که می‌توانند در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه سراسری به تغذیه بارهای محلی ادامه دهند. ساختار کلی یک ریزشبه در شکل ۱ دیده می‌شود. ریزشبه و شبکه سراسری در نقطه اتصال مشترک^۱ (PCC) به یکدیگر وصل می‌باشند. ریزمنابع مورد استفاده در این شبکه‌ها به واسطه عناصر الکترونیک قدرت به باس اصلی متصل می‌شوند. به همین دلیل در ریزشبه وجود منابع AC و همچنین DC میسر خواهد بود. منابع DC، همچون سلول‌های خورشیدی و سوختی با واسطه المان‌های DC/AC به منظور متناوب‌سازی ولتاژ DC و منابع AC، همراه با واسطه‌های AC/DC/AC که به منظور هم‌زمان سازی فرکانسی در این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نوسانی بودن توان منابع پراکنده به دلیل استفاده از منابعی مانند باد و خورشید و همچنین اینرسی پایین این شبکه‌ها، پارامترهای اساسی شبکه می‌تواند با کوچک‌ترین اغتشاشی دست‌خوش تغییراتی اساسی شده و پایداری ریزشبه به خطر بیفتد [۶].

برای غلبه بر این مسایل، حضور منابع ذخیره‌کننده انرژی همچون باتری‌ها و Flywheel‌ها ضروری خواهد بود. به هر کدام از منابع، یک سوئیچ وصل شده است تا در موقع لازم از ریزشبه جدا گردند. موارد ذکر شده در شکل ۱ به طور کامل نشان داده شده است.

در [۴]، [۶] و [۸] تا [۱۱] تعریف کامل و جامعی نسبت به ریزشبه‌ها، مزایا و معایب آنها صورت گرفته است. مدل ریاضی منابع موجود در

1. Point of Common Coupling



شکل ۳: فرکانس سیستم، (الف) بدون حضور کنترل کننده اولیه و (ب) در حضور کنترل کننده.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل فرکانسی ریزشبه.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D (pu/Hz)	۰/۰۱۲	T_{DEG} (s)	۲
$2H$ (pu s)	۰/۱۶۶۷	T_{WTG} (s)	۱/۵
T_{FESS} (s)	۰/۱	T_{AE} (s)	۰/۵
T_{BESS} (s)	۰/۱	K_{WTG}	۱
T_{Fc} (s)	۴	R (Hz/pu)	۳
K_{FC}	۱/۱۰۰	K_a	۰/۶
K_{AE}	۱/۵۰۰	K_{DEG}	۱/۳۰۰
K_{BESS}	-۱/۳۰۰	K_{FESS}	-۱/۱۰۰

جدول ۲: مقادیر ضرایب کنترل کننده PI بر اساس روش زیگلر- نیکولز.

ضرایب کنترلی	مقدار
K_p	۵
K_i	۲۲

کنترل و محدود نشود، شاهد ناپایداری فرکانسی خواهیم بود. حلقه کنترلی اولیه، اولین حلقه کنترلی بوده که به محدود کردن افت فرکانس بعد از اتفاق افتادن اغتشاش اقدام می نماید. این حلقه کنترلی بر اساس مشخصه فرکانس- توان حقیقی یک ژنراتور مطابق با (۱) عمل کرده و این حلقه به روی خود ژنراتور تعبیه شده است

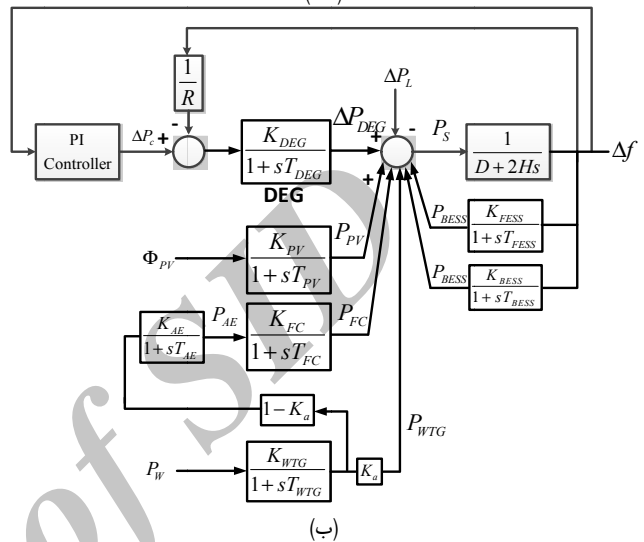
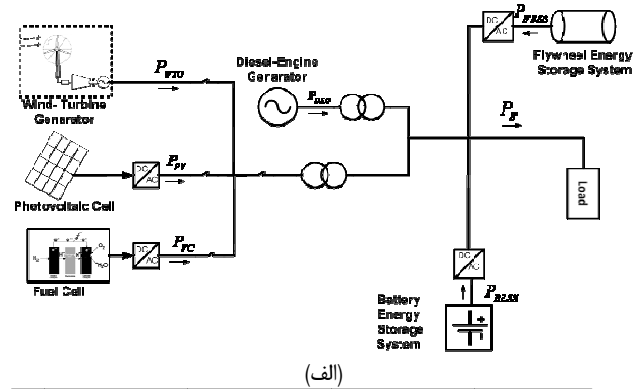
$$f - f_0 = -k_p (P - P_0) \quad (1)$$

که f و P به ترتیب فرکانس و توان نامی شبکه می باشند. وضعیت تغییر فرکانس در حضور و عدم حضور کنترل کننده اولیه در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴-۲ کنترل ثانویه

حلقه کنترلی اولیه، فرکانس افت کرده را محدود می کند اما در برگرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان بوده و از این رو حلقه تکاملی دیگری با نام کنترل ثانویه فرکانس نیز استفاده می شود. در این حلقه کنترلی اغلب از کنترل کننده های کلاسیک PI برای بازگرداندن فرکانس به مقدار اولیه استفاده می شود. تنظیم کردن این کنترل کننده ها بیشتر بر اساس روش های کلاسیک و سعی و خطا خواهد بود.

مشکلات این روش ها در بخش های قبلی ذکر گردید و بر اساس همین دلایل در این مقاله سعی شده است که ضمن استفاده از این کنترل کننده ها، مشکلات آنها را نیز با به کارگیری روش هوشمندی که مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی بوده، برطرف کرد. در ادامه معرفی مختصری از شبکه های عصبی مصنوعی و روش کنترلی پیشنهادی در ریزشبه آزمون ارائه خواهد گردید.



شکل ۲: سیستم آزمون، (الف) مدل واقعی ریزشبه و (ب) مدل پاسخ فرکانسی ریزشبه.

همان طور که در شکل ۲-ب دیده می شود، یک کنترل کننده کلاسیک PI به منظور حفظ پایداری فرکانسی ریزشبه در نظر گرفته شده که در ابتدا به وسیله روش زیگلر- نیکولز که یکی از روش های قوی کلاسیک در تنظیم ضرایب کنترلی بوده، تنظیم می شود و سپس توسط شبکه های عصبی مصنوعی به صورت آنلاین تنظیم و بهینه می شود. مقادیر ضرایب کنترلی کننده PI بر اساس روش کلاسیک زیگلر- نیکولز در جدول ۲ ذکر شده است. در مورد روش های کلاسیک تنظیم کنترل کننده های PI/PID توضیحات کاملی در [۱۷] ذکر شده است.

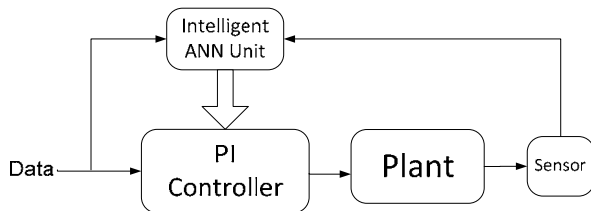
پاسخ های این کنترل کننده ها در طی چندین شبیه سازی مختلف مقایسه شده و می توان ارزیابی درستی از عملکرد مناسب تر روش کنترلی پیشنهادی در مقایسه با روش های رایج داشت.

۴-۳ کنترل فرکانس

سیستم قدرت در حالت کار ماندگار در تعادل میان تولید و مصرف به سر می برد و اگر بنا به رخداد اغتشاشی این تعادل از بین برود، فرکانس از مقدار نامی دور خواهد شد. اگر نوسانات فرکانس سیستم کنترل نشود، می تواند خسارات زیادی، حتی تا خاموشی یک واحد تولیدی در برداشته باشد. پس در ادامه به حلقه های کنترلی که در سیستم های قدرت مرسوم جهت کنترل فرکانس در نظر می گیرند، اشاره ای خواهد شد [۱۸] و [۱۹].

۴-۱ کنترل اولیه

اگر اغتشاشی در سیستم قدرت روی دهد و سبب بر هم خوردن تعادل میان تولید و مصرف شود، فرکانس نوسان خواهد کرد. به طور مثال اگر بار به ناگاه اضافه شود، فرکانس از مقدار نامی افت خواهد کرد که اگر



شکل ۵: ساختار کنترلی پیشنهادی برای هوشمندسازی یک کنترل کننده کلاسیک.

تولیدی، به ناچار گاهی اوقات یک سری از بارها تحت پایین آمدن فرکانس یا پروفایل ولتاژ از سیستم جدا می‌گردند. این جداسازی، بر پایداری سیستم قدرت اثر مستقیمی خواهد داشت. شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزاری بسیار مناسب برای تحلیل چگونگی انجام این کار خواهد بود که در [۲۵] به آن پرداخته شده است.

۶- روش کنترلی پیشنهادی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی

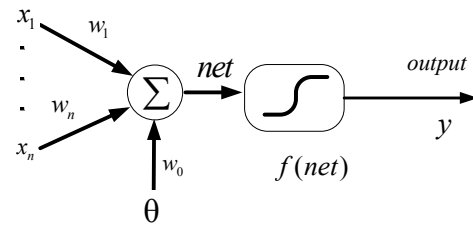
چارچوب کنترلی در نظر گرفته شده برای تنظیم آنالین یک کنترل کننده کلاسیک PI که در فرایند کنترل ثانویه فرکانس به کار گرفته شده است، در شکل ۵ آمده است. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان یک واحد نظارتی و هوشمند با جمع کردن اطلاعات از داده‌های ورودی و خروجی و بر اساس تغییرات حاصله در سیستم، ضرایب کنترل کننده را به صورت آنالین (خودکار) بهینه و تنظیم می‌کند.

ساختار در نظر گرفته شده برای شبکه عصبی مصنوعی، به منظور تنظیم آنالین کنترل کننده PI در شکل ۶ نشان داده شده است. شبکه در نظر گرفته شده، یک شبکه چند لایه بوده که در آن ۲۰ نرون به عنوان لایه ورودی و ۲ نرون به عنوان لایه خروجی (مطابق با تعداد ضرایب کنترلی که بایستی تنظیم شوند) در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۶ X ، W_1 و W_2 به ترتیب بردار ورودی و بردارهای وزنی لایه‌های اول و دوم هستند.

شبکه عصبی مصنوعی ابتدا توسط داده‌های واقعی به صورت اولیه یاد می‌گیرد که ضرایب را بر چه اساسی تغییر دهد تا فرکانس سیستم پایدار بماند و سپس مطابق با الگوریتمی که در ادامه خواهد آمد این ضرایب را به صورت بهینه به روز می‌کند تا همیشه کنترل کننده در بهترین مقادیر تنظیم شود.

در قسمت تغییرات بار ریزشبه (ΔP_L) ، یک نویز سفید اعمال کرده و در حالتی که همان کنترل کننده PI در سیستم قرار دارد، اطلاعات مرجعی از نحوه رفتار، تغییرات سیستم و انحرافات فرکانسی ریزشبه قابل دریافت است. مجموعه‌هایی از مقادیر انحرافات فرکانسی (Δf) و مقادیر خروجی کنترل کننده (ΔP_c) برای تنظیم اولیه شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شود تا شبکه جواب‌های غیر قابل تصویری به کنترل کننده اعمال نکند. متغیرهای ذکر شده یعنی ΔP_L ، Δf و ΔP_c در شکل ۲- ب نشان داده شده است.

اساس کار با توجه به شکل ۶ بدین صورت است که با استفاده از بردارهای ورودی و بردار وزنی لایه‌های اول و دوم قسمت پیش‌رو^۱ کامل شده و بر اساس ضرایبی از انحرافات فرکانسی که با جزئیات کامل ذکر خواهد شد، مقادیر لایه‌های وزنی به روز خواهد شد. این به روز کردن وزن‌ها در قسمت پیش‌خور^۲ رخ خواهد داد.



شکل ۴: یک مدل ریاضی نوعی از نرون‌ها در شبکه‌های عصبی مصنوعی.

۵- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) تخمینی ساده از قسمتی از ذهن انسان بوده که از عناصر پردازشی ساده‌ای (نرون) تشکیل شده‌اند و بنا به ترکیب این عناصر، هدف خاصی را دنبال خواهند کرد. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از ابزارهای توانا در فرایندهای بهینه‌سازی هستند، زیرا این شبکه‌ها توانایی گسترده‌ای در پردازش و یادگیری به صورت موازی دارند. بر اساس ساختار این شبکه‌ها و چگونگی ترکیب شدن عناصر پردازشی، چندین کاربرد مهم و اساسی از جمله مدل‌سازی ذهن، مدل‌سازی مالی، پیش‌بینی سری‌های زمانی، سیستم‌های کنترلی و بهینه‌سازی برای آنها متصورند. برای به کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در فرایندهای ذکر شده، لازم است که یک مدل ریاضی از آنها را در نظر بگیریم. یک مدل ریاضی ساده جهت تحلیل رفتار آنها در شکل ۴ نشان داده شده است. بردار X ها، W ها، θ و $f(net)$ به ترتیب بردارهای ورودی و وزن‌ها، مقدار بایاس و تابع در نظر گرفته شده برای نرون که خطی و غیر خطی در نظر گرفته می‌شوند، هستند. خروجی این مدل مطابق با (۲) خواهد بود [۲۰]

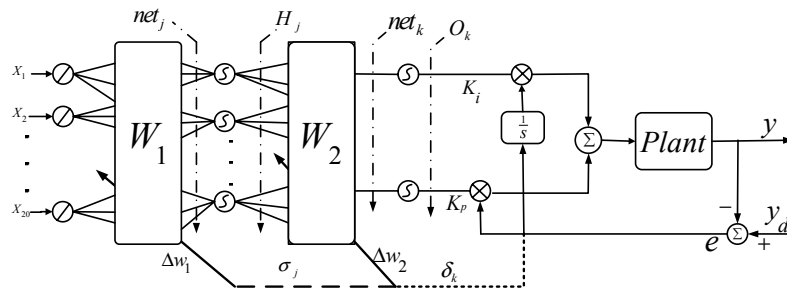
$$y(k) = f\left(\sum_{j=1}^n W_j x_j(k) + W_0 \theta\right) \quad (2)$$

برای تابع خروجی معمولاً توابعی نظیر خطی، لگاریتمی و تانژانتی در نظر گرفته می‌شود که بیشتر به کاربردی که از شبکه عصبی انتظار است، در نظر گرفته می‌شوند. مزیت توابع غیر خطی نسبت به توابع خطی در به روز کردن آرام وزن‌ها بوده و سبب می‌شود که سیستم با تغییراتی ناگهانی مواجه نشود.

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در بسیاری از کارهای بهینه‌سازی، شناسایی، کنترل و تشخیص الگو گزارش شده است. در همین زمینه، در [۲۱] قابلیت شبکه‌های عصبی در تضمین پایداری ولتاژ مطالعه شده است. بدین منظور یک شبکه عصبی چند لایه با روش یادگیری پس‌انتشار برای افزایش حاشیه پایداری ولتاژ استفاده گردیده است. مدل‌سازی سیستم‌های غیر خطی و پیچیده یکی دیگر از کاربردهای مهم شبکه‌های عصبی مصنوعی است که در [۲۲] به مدل‌سازی بار دینامیکی و یافتن مکان بار بررسی شده است. کنترل توان تولیدی در یک سیستم قدرت به هم پیوسته چندناحیه‌ای، از طریق روش هوشمند ترکیبی از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی در [۲۳] مطالعه شده است. به منظور تعیین سیگنال‌های ورودی شبکه عصبی، سیگنال‌های خطای توان بین ناحیه‌ای و انحرافات فرکانسی استفاده گردیده است. در این تحقیق به وسیله روش هوشمند ذکر شده، به نوعی کنترل اتوماتیک و هوشمندانه تولید توان صورت گرفته است. شناسایی سیستم‌ها یکی از مهم‌ترین کاربردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی است که در [۲۴] به آن پرداخته شده است.

برای حفظ پایداری فرکانس و ولتاژ در شرایط اضطراری سیستم‌های قدرت متعاقب خطاهای شدیدی همچون بارهای پله‌ای یا خروج واحدهای

1. Feed - forwrad
2. Feed - back



شکل ۶: ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای تنظیم آنلاین یک کنترل کننده PI.

$$\begin{aligned} w_r(k+1) &= w_r(k) + \Delta w_r = w_r(k) + \eta \sigma H \\ w_l(k+1) &= w_l(k) + \Delta w_l = w_l(k) + \eta \delta X \end{aligned} \quad (5)$$

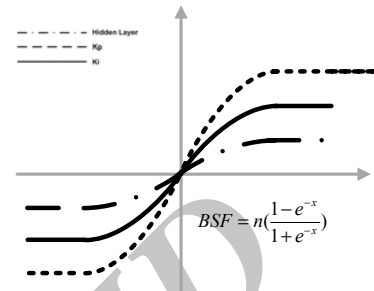
در (۵)، ΔW_l و ΔW_r مطابق با (۶) و (۷)، بردار تغییراتی است که در مقادیر اولیه وزن‌های لایه‌های اول و دوم داده می‌شوند تا تابع عملکرد داده شده در (۴) در طی چندین به روز رسانی، به کم‌ترین مقدار خود برسد. این عملیات در حین کارکردن ریزشکده رخ داده و همیشه سعی بر این دارد که ضرایب کنترلی را به شکلی تغییر دهد که فرکانس سیستم با کم‌ترین نوسان به مقدار نهایی خود بازگردد. تمام پارامترهایی که در محاسبه روابط ΔW_l و ΔW_r استفاده شده همانند σ_j ، δ_k ، H_j و Net_j ، در شکل ۶ قابل مشاهده است که در آن η نرخ یادگیری بوده و مقدار کوچک مثبتی است [۲۶] و [۲۷]

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta W_r &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_r} \\ \frac{\partial E}{\partial w_r} &= \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial w_r} \\ \frac{\partial u}{\partial net_k} &= f'(net_k), \quad \frac{\partial net_k}{\partial w_r} = H_j \\ \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial net_k} &= \delta_k \\ \Delta W_r &= \eta \delta_k H_j \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta W_l &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_l} \\ \frac{\partial E}{\partial w_l} &= \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial H_j} \cdot \frac{\partial H_j}{\partial net_j} \cdot \frac{\partial net_j}{\partial w_l} \\ \frac{\partial u}{\partial net_k} &= f'(net_k), \quad \frac{\partial net_k}{\partial H_j} = W_r, \quad \frac{\partial H_j}{\partial net_j} = f'(net_j) \\ \frac{\partial net_j}{\partial w_l} &= X \\ \Delta W_l &= \eta \cdot \delta_k \cdot f'(net_k) \cdot W_r \cdot f'(net_j) \cdot X = \eta \cdot \sigma_j \cdot X \end{aligned} \right. \quad (7)$$

۷- نتایج شبیه‌سازی‌ها

برای ارزیابی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی، چندین اغتشاش متفاوت به ریزشکده آزمون اعمال کرده و پاسخ سیستم در حضور کنترل‌کننده‌های کلاسیک و پیشنهادی مقایسه شده است. همان طور که در بخش قبلی ذکر گردید، در ریزشکده‌ها منابعی مانند پانل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی وجود دارند که توان این منابع به صورت نوسانی است. از این رو برای در نظر گرفتن این حالت، نوسانات



شکل ۷: توابع در نظر گرفته شده برای لایه‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی.

شرایط اولیه یکی از مهم‌ترین ارکان در شبکه‌های عصبی مصنوعی محسوب می‌شود. با اشتباه انتخاب کردن آنها، جواب نهایی شکل مناسب و بهینه خود را از دست می‌دهد و حتی در بعضی از موارد نیز منجر به واگراشدن جواب شبکه عصبی خواهد شد. انتخاب مقادیر اولیه به شناخت از سیستم و شبکه‌های عصبی بستگی دارد. در این مقاله با توجه به مطالب ذکر شده، مقادیری که در (۳) داده شده است به عنوان مقادیر اولیه برای پارامترهایی که در شکل ۶ نشان داده شد، در نظر گرفته شده است

$$\begin{cases} X = \text{ones}(20, 1) \\ W_l = \text{rand}(10, 20) \\ W_r = \text{rand}(2, 10) \end{cases} \quad (3)$$

توابع در نظر گرفته شده در شکل ۶ برای لایه اول خطی و برای لایه‌های دوم و خروجی (ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی) توابع غیر خطی مطابق با آنچه که در شکل ۷ دیده می‌شود، خواهد بود.

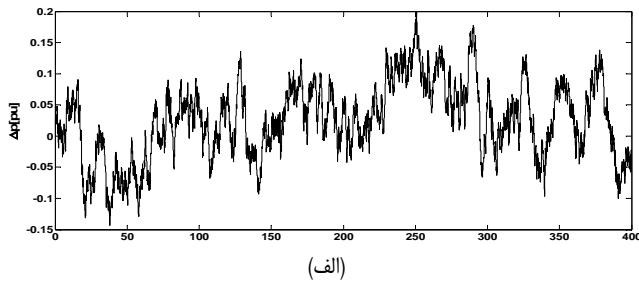
روش به کار گرفته شده برای به روز کردن وزن‌ها بر اساس روش پس‌انتشار صورت گرفته است. اطلاعات کاملی در مورد روش‌های یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در [۲۶] و [۲۷] ذکر شده است. از مزیت‌های روش پس‌انتشار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قابلیت بالای به کارگیری برای سیستم‌های غیر خطی و پیچیده
- سادگی به کارگیری
- توان تعمیم‌دهی بالا
- کوتاه‌بودن زمان یادگیری برای رسیدن به همگرایی

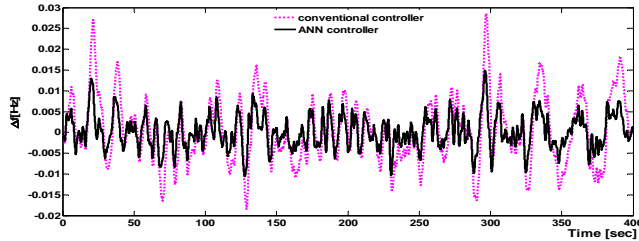
بر اساس روش به کار گرفته شده در مقاله سعی می‌شود که مقدار تابع عملکرد داده شده در (۴) در هر به روز کردن وزن‌ها حداقل مقدار را داشته باشد. y^d سیگنال مرجع و y^m اشاره به خروجی لایه‌های خروجی دارد

$$E = 0.5(y^d - y^m)^2 \quad (4)$$

فرآیندی که در این روش برای به روز کردن وزن‌ها بر اساس روش پس‌انتشار در نظر گرفته شده تا مقادیر بهینه‌ایی برای ضرایب کنترلی پیدا شود، مطابق با (۵) است

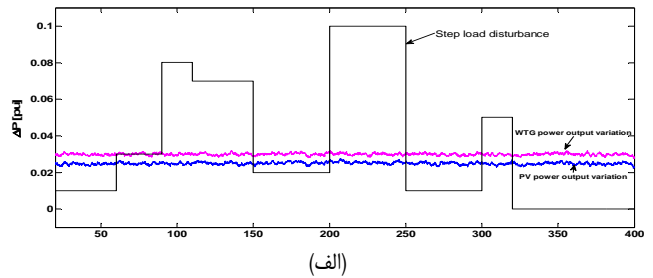


(الف)

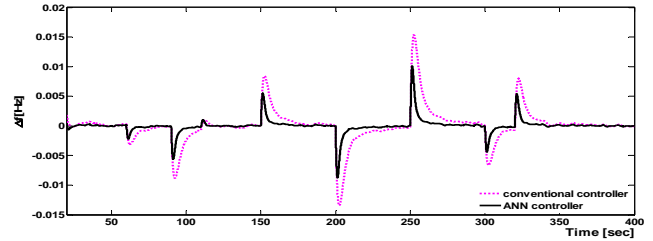


(ب)

شکل ۹: (الف) نویز سفید و (ب) فرکانس ریزشبه.

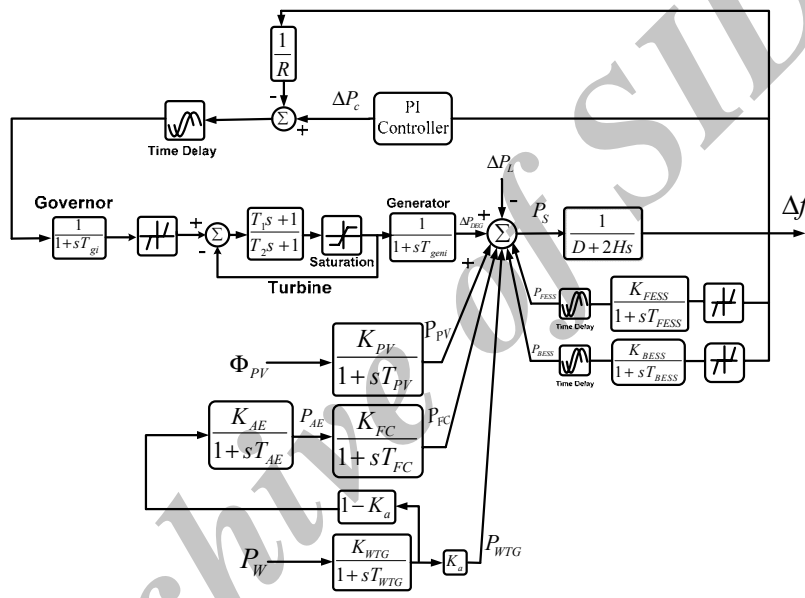


(الف)



(ب)

شکل ۸: (الف) اغتشاش‌های وارد به ریزشبه و (ب) فرکانس ریزشبه در حضور کنترل کننده‌های هوشمند و کلاسیک.



شکل ۱۰: مدل فرکانسی ریزشبه با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی.

مطالعات فرکانسی، از مدل‌های خطی جهت تحلیل رفتار سیستم استفاده می‌شود. اما برای بهبود مدل در نظر گرفته شده و نزدیک‌تر شدن به پاسخ واقعی ریزشبه، یک سری المان‌های غیر خطی، محدودکننده و تأخیرهای زمانی به مدل فرکانسی اولیه اضافه شده که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های فیزیکی مربوط به ژنراتور دیزلی بوده، که در اثر محدودیت‌های مکانیکی و گرمایی توانایی پاسخ به اغتشاش‌های وارده در آن واحد را نداشته و همیشه بین اتفاق افتادن اغتشاش و پاسخ به آن تأخیری وجود دارد. همچنین به دلیل وجود فیلترهای متفاوت و کانال‌های مخابراتی، در انتقال پارامترهای اندازه‌گیری شده به سیستم‌های کنترلی نیز تأخیری وجود دارد. پس به خاطر دلایل ذکر شده بلوک‌های تأخیری به مدل سیستم اضافه شده است. برای موارد تأخیری یک بلوک تأخیر زمانی به مدت یک سیکل (۲۰ میلی‌ثانیه) در نظر گرفته شده است. سیگنال‌های کنترلی نیز تا حد مشخصی می‌توانند کم و زیاد شوند و منابع تولید دارای باند مرده‌ای هستند که تا سیگنال ورودی کنترلی به این منابع، به حد مشخص نرسد، فعال نخواهند شد. همچنین نرخ افزایش یا کاهش تولید ژنراتورها نیز محدود است. پس مدل در نظر گرفته شده برای ژنراتور دیزلی با اضافه کردن یک بلوک غیر خطی برای در نظر

توان مکانیکی توربین بادی و نوسانات شار نور خورشید و همچنین چندین بار پله‌ای تصادفی مطابق با آنچه که در شکل ۸-الف دیده می‌شود به ریزشبه اعمال شده و پاسخ فرکانسی سیستم در شکل ۸-ب دیده می‌شود. از شکل ۸-ب قابل مشاهده است زمانی که شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است به مراتب عملکرد مطلوب‌تری مشاهده می‌شود و در نتیجه نوسانات و انحراف‌های فرکانسی در مقایسه با کنترل کننده کلاسیک بسیار کمتر خواهد بود.

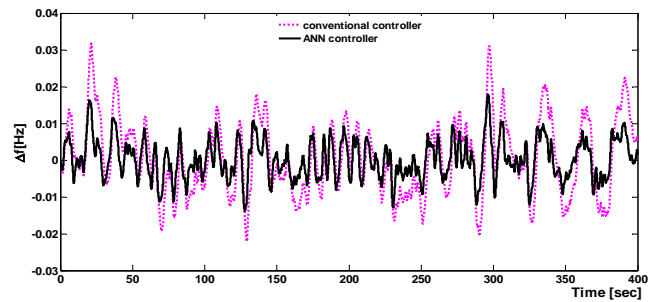
در شبیه‌سازی بعدی سعی شده که به ریزشبه یک اغتشاش سنگین‌تر اعمال شود. در این شبیه‌سازی، یک نویز سفید را که دامنه آن از 0.2 pu تا 0.7 pu متغیر است به سیستم اعمال کرده و نتایج آن در شکل ۹ نشان داده می‌شود. در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب به ترتیب نویز سفید اعمالی و فرکانس ریزشبه متعاقب این نویز سفید مشاهده می‌شود. به وضوح قابل مشاهده است که در این شبیه‌سازی نیز کنترل کننده هوشمند پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده کلاسیک PI عملکرد مطلوب‌تری را دارا است. همان گونه که در شکل ۲-ب نشان داده شد، مدل فرکانسی در نظر گرفته شده از ریزشبه، یک مدل خطی بوده که از بعضی دینامیک‌ها و محدودیت‌های فیزیکی صرف نظر شده است. هرچند که در بیشتر

fuzzy tuning approach," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1-10, Dec. 2012.

- [8] R. H. Lasseter, "MicroGrids," in *Proc IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 305-308, 2002.
- [9] R. H. Lasseter, "Certs microgrid," in *Proc. IEEE Int. Conf. on System of Systems Engineering, SoSE'07*, 5 pp., Apr. 2007.
- [10] R. H. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Meliopoulos, and R. J. Yinger, "The CERTS microgrid concept," *White Paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, U.S. Dept. Energy*, Apr. 2002.
- [11] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," in *Proc. IEEE 35th Annual the Power Electronics Specialists Conf., PESC'04*, vol. 6, pp. 4285-4290, 20-25 Jun. 2004.
- [12] P. Basak, A. K. Saha, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Microgrid: control techniques and modeling," in *Proc. of the 44th Int. Universities Power Engineering Conf.*, 5 pp., 1-4 Sep. 2009.
- [13] J. Pecos Lopes, A. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 919-920, May 2006.
- [14] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [15] D. J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311-320, Mar. 2008.
- [16] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, "A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 406-414, Jun. 2005.
- [17] D. Xue, Y. Chen, and D. P. Atherton, *Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
- [18] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, Springer, 2009.
- [19] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, D. Hill, J. A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
- [20] H. Bevrani and T. Hiyama, *Neural Network Based AGC Design, Chapter 5 in Intelligent Automatic Generation Control*, New York: CRC Press (Taylor & Francis Group), Apr. 2011.
- [21] A. A. El-Keib and X. Ma, "Application of artificial neural networks in voltage stability assessment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 1890-1896, Nov. 1995.
- [22] T. Hiyama, M. Tokieda, W. Hubbi, and H. Andou, "Artificial neural network based dynamic load modeling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1576-1583, Nov. 1997.
- [23] P. Subbaraj and K. Manickavasagam, "Automatic generation control of multi-area power system using fuzzy logic controller," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 18, no. 3, pp. 266-280, Apr. 2008.
- [24] S. R. Chu, R. Shoureshi, and M. Tenorio, "Neural networks for system identification," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 31-35, Apr. 1990.
- [25] C. T. Hsu, M. S. Kang, and C. S. Chen, "Design of adaptive load shedding by artificial neural networks," *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 152, no. 3, pp. 415-421, 2005.
- [26] H. Bevrani, (2011). *Artificial Neural Networks*, Lecture notes, available on line from <http://www.bevrani.com/ANN/ANN.htm>.
- [27] M. M. Gupta, *Static and Dynamic Neural Networks: from Fundamentals to Advanced Theory*, IEEE Press & John Wiley, 2003.

فرشید حبیبی مدرک کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت خود را به ترتیب در سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ از دانشگاه کردستان دریافت نمود. از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۲ نامبرده به عنوان کارشناس آزمایشگاه و مدرس با دانشگاه کردستان همکاری داشته است. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده شبکه های هوشمند الکتریکی، ریزشبکه ها، تولید پراکنده، تحلیل دینامیک و پایداری سیستم قدرت است.

حسن بیورانی دکترای مهندسی برق-کنترل را از دانشگاه اوزاکا (ژاپن) در سال ۱۳۸۳ اخذ و در سال ۱۳۸۵ نیز دوره فوق دکتری را در دانشگاه کوماموتو (ژاپن) به پایان رسانده است. از آن پس به مدت حدود چهار سال در دانشگاه های اوزاکا، صنعتی کوبینزوند (استرالیا)، صنعتی کیوشو (ژاپن) و کوماموتو (ژاپن) به عنوان محقق مدعو، محقق ارشد، استادیار و استاد به تدریس و تحقیق پرداخته است. در حال حاضر نیز به عنوان دانشیار در دانشگاه کردستان مشغول به کار می باشد. حوزه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان کنترل



شکل ۱۱: فرکانس ریزشبکه غیر خطی متعاقب نویز سفید.

گرفتن محدودیت های ذکر شده، مطابق با آنچه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، دقیق تر شده است [۱۸].

برای نشان دادن عملکرد مطلوب تر کنترل کننده هوشمند طراحی شده بر اساس شبکه های عصبی مصنوعی، نویز سفید به این مدل اعمال شده و وضعیت فرکانس ریزشبکه در دو حالت استفاده از کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده کلاسیک PI در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنان که در این حالت نیز قابل مشاهده است، کنترل کننده هوشمند طراحی شده عملکرد به مراتب مطلوب تری دارد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مروری بر دلایل ظهور تولیدکننده های پراکنده و ریزمنابع در سیستم های قدرت مدرن شد. سپس با توجه به دلایلی که برشمرده شد، برای یک پارچه در نظر گرفتن ریزمنابع و بارهای محلی، مفهوم ریزشبکه ها مطرح گردید که نیاز به روش های کنترلی هوشمند در این سیستم ها بیش از سیستم های قدرت مرسوم احساس می شد. در این مقاله تلاش شد که ضمن استفاده از کنترل کننده های مرسوم، مشکلات آنها نیز برطرف شود. از این رو اقدام به طراحی یک کنترل کننده هوشمند PI در امر کنترل ثانویه فرکانس یک ریزشبکه، بر اساس شبکه های عصبی مصنوعی گردید. عملکرد مطلوب روش کنترلی پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده های کلاسیک در چندین شبیه سازی نشان داده شد. از نتایج حاصل شده، این عملکرد مطلوب به وضوح قابل برداشت بوده و انحراف های فرکانسی ریزشبکه متعاقب اغتشاش های وارده توسط روش کنترلی پیشنهادی به مراتب کاهش یافته است.

مراجع

- [1] P. Barker and R. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1645-1656, Seattle, WA, US, 16-20 Jul. 2001.
- [2] H. Puttgen, P. MacGregor, and F. Lambert, "Distributed generation: semantic type or the dawn of a new era?," *IEEE Trans. on Power and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 22-29, Jan/Feb. 2003.
- [3] F. Habibi, A. H. Naghshbandy, and H. Bevrani, "Robust voltage controller design for an isolated microgrid using Khariitonov's theorem and D-stability concept," *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 656-665, Jan. 2013.
- [4] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, and J. Roy, "CERTS microgrid laboratory test bed," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 325-332, Jan. 2011.
- [5] C. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, the Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
- [6] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, "Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186-202, Jan. 2011.
- [7] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an AC microgrid: online PSO-based

جمال مشتاق در سال ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمود. نام‌برده مدرک دکترای خود را از دانشگاه واس انگلستان در سال ۸۵ اخذ نمود. دکتر مشتاق از سال ۱۳۷۶ در دانشگاه کردستان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت‌علمی این دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان سیستم‌های قدرت، تحلیل حالت گذرا، مکانیزاسیون سیستم‌های توزیع و تولیدات پراکنده است.

مقاوم و هوشمند شبکه‌های الکتریکی و سیستم قدرت است. ایشان در اجرای بیش از ۱۰ پروژه داخلی و خارجی مشارکت مؤثر داشته و دستاوردهای علمی و پژوهشی خویش را در سه کتاب و ۱۰ فصل کتاب بین‌المللی، بیش از ۱۰ گزارش فنی و ۱۵۰ مقاله به رشته تحریر درآورده است.

Archive of SID