

ارائه یک کنترل کننده هوشمند فازی خودتنظیم بهینه شده جهت بهبود کنترل فرکانس ریز شبکه با استفاده از الگوریتم PSO در حضور عوامل غیر خطی

امیرحسین ناظری اردکانی^۱ علی اصغر خدادوست آرانی^۲ محمد باقر منهج^۳ مهدی کراری^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

amir.soaut.2009@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری و کارشناس شرکت توزیع برق شهرستان اصفهان، اصفهان- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-

تهران- ایران

a.a.khodadoost@aut.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

menhaj@aut.ac.ir

۴- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

karrari@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله ابتدا از یک مدل پاسخ فرکانسی که تاثیر تغییرات تولید خروجی واحد های موجود در ریز شبکه نمونه مستقل از شبکه اصلی را روی تغییرات فرکانس نشان می دهد، استفاده شده است و برای واقعی تر شدن مدل پاسخ فرکانسی مورد نظر، عوامل غیر خطی مانند بلوک های تاخیر زمانی و باندهای مرده و محدود کننده هایی نیز به مدل مورد نظر اضافه شده است. برای حفظ فرکانس در مقدار نامی خود از یک کنترل کننده قبل از دیزل ژنراتور استفاده شده است تا بتواند توان خروجی دیزل را متناسب با تغییرات افزایشی و کاهششی بار مصرف کنندگان که به صورت پله ای و ناگهانی رخ می دهد، به خوبی تنظیم نماید. ابتدا یک کنترل کننده PI کلاسیک برای ژنراتور دیزل طراحی شده است. برای بهبود کنترل فرکانس در حضور عوامل غیر خطی، یک کنترل کننده PI فازی برای ریز شبکه طراحی شده تا عملکرد نسبتاً مناسب تری را داشته باشد و برای بهبود عملکرد کنترل کننده PI فازی مورد نظر دو سیستم فازی هوشمند به کنترل کننده PI فازی اضافه شده تا کنترل کننده PI فازی مورد نظر را متناظر با میزان تغییرات بار و فرکانس به صورت آنالین بروز کند تا عملکرد به مراتب بهتری را نسبت به دو کنترل کننده قبل داشته باشد. همچنین پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده PI فازی در اینجا با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه شده است تا بتوان به پاسخ بهینه کنترل کننده PI فازی دست یافت. نتایج شبیه سازی ها، کارایی کنترل کننده هوشمند فازی پیشنهادی طراحی شده را در شرایط مختلف عملکردی ریز شبکه به خوبی نشان می دهد.

کلمات کلیدی: کنترل کننده فازی هوشمند خودتنظیم، فرکانس، ریز شبکه، PSO، عوامل غیر خطی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۸

نام نویسنده ی مسئول: علی اصغر خدادوست آرانی

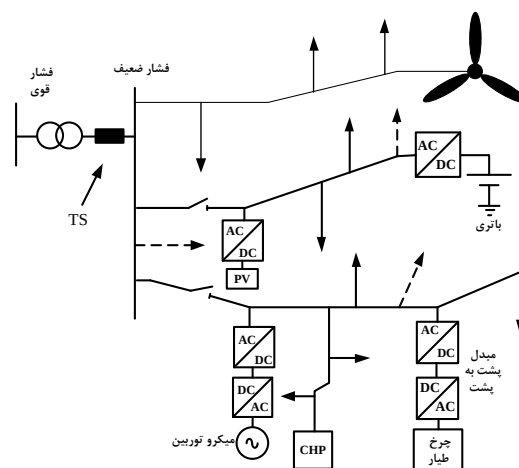
نشانی نویسنده مسئول: اصفهان، شرکت توزیع برق شهرستان اصفهان، اصفهان، خ عباس آباد

۱- مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی، پیشرفت‌های حاصل در فناوری‌های مختلف و افزایش توجه به تولیداتی با میزان آلودگی کمتر در سراسر دنیا باعث شده است انواع مختلفی از منابع انرژی الکتریکی در سراسر دنیا به کار گرفته شود. سلول‌های سوختی به عنوان تولیدکننده‌های سبز، تولیدات مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد و انرژی خورشید نمونه‌هایی از این تولیدات هستند که در کنار سایر تولیدکننده‌های مرسوم قبلی مانند ژنراتورهای دیزل کوچک به کار گرفته می‌شوند. بسیاری از منابع به کار گرفته شده مانند سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در شبکه الکتریکی، پیچیدگی‌ها و نایقینی‌هایی را به همراه دارند [۴-۱].

به منظور مقابله با این موارد در کنار تولیدات اصلی نمونه‌هایی از ذخیره‌سازها نیز به کار می‌روند. ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی مانند باتری، ذخیره‌سازهای الکترومکانیکی مانند ذخیره‌ساز چرخ طیار و ... نمونه‌هایی از این موارد هستند [۶-۵].

از سویی دیگر کاربرد ذخیره‌سازها و منابع تولید در شبکه‌های ولتاژ پایین در نزدیکی بارها مفهوم ریزشبکه‌ها را توسعه داده است. ریزشبکه‌ها در کنار مزایایی که در مورد قابلیت اطمینان بارهای حساس و کاهش تلفات ناشی از انتقال ارائه نموده‌اند، چالش‌ها و مشکلاتی را به همراه آورده‌اند. شکل (۱) نمونه‌ای از ریزشبکه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمونه‌ای از ریزشبکه

زمانی که ریزشبکه به شبکه بالادست متصل باشد شبکه بالادست ریزشبکه را از لحاظ ولتاژ و فرکانس پشتیبانی می‌کند. در این حالت معمولاً وظیفه کنترل فرکانس بر عهده شبکه بالادست به عنوان باس بینهایت است. در حالتی که ریزشبکه از شبکه بالادست جدا شود وظیفه کنترل فرکانس بر عهده واحدهای موجود در ریزشبکه است. از آنجائیکه اساس کار ریزشبکه‌ها بر تولیدات با سطح تولید توان پایین است، کنترل فرکانس با همکاری چندین واحد صورت می‌گیرد.

تولیداتی مانند سلول‌های خورشیدی و بادی به علت داشتن ماهیت نایقینی امکان شرکت در کنترل فرکانس را ندارند [۷]. در چنین حالتی یکی از واحدها (ژنراتور دیزل و یا اینورتر منبع ولتاژ) به عنوان مرجع ولتاژ و فرکانس در نظر گرفته می‌شود و ذخیره‌سازها با استراتژی جبران سازی افت فرکانس به کار می‌روند. اساس عملکرد دیزل ژنراتور براساس معادله افتی (Droop) است. در این روش ژنراتور سنکرون یا اینورتر منبع ولتاژ، بر اساس کنترل اولیه خود، هرچه افت فرکانس بیشتری در ریزشبکه رخ داده باشد، توان بیشتری به ریزشبکه تزریق می‌کند تا تغییرات بار را جبران کند [۸].

در چنین شرایطی برای کنترل ثانویه فرکانس (کنترل اتوماتیک تولید) باید فرکانس بی‌باری در روش افتی افزایش یابد. کنترل‌کننده‌ی که استفاده می‌شود، معمولاً کنترل‌کننده انتگرالگیر-تناسبی است [۱۳-۹]. در [۱۴] از یک کنترل‌کننده فازی جهت بهبود کنترل فرکانس استفاده شده است. کنترل‌کننده فازی در مقایسه با کنترل‌کننده انتگرالگیر تناسبی ساده که فقط برای یک نقطه کار طراحی شده است، پاسخ بهتری ارائه می‌کند.

در [۱۵] یک روش ترکیبی جدید برای کنترل ثانویه در ریزشبکه‌ها بر اساس روش‌های کنترل مقاوم استفاده شده است. در [۱۶] یک کنترلر خودتنظیم بر گرفته از رفتارات احساسی انسان برای کنترل فرکانس در ریزشبکه‌ها ارائه شده است. در [۱۷] یک کنترلر فازی برای کنترل فرکانس ریزشبکه با حضور خودروهای الکتریکی بیان شده است و ادعا شده که کنترلر مقاوم مورد استفاده می‌تواند برای توپولوژی‌های مختلف شبکه به کار می‌رود. در [۱۸] نیز یک کنترلر فازی بهینه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بکه قدرت برپتانیا تهیه شده است. اما لزوماً کنترلر مورد استفاده برای یک شبکه بزرگ قدرت نمی‌تواند در ریزشبکه‌ها که به مراتب کوچک‌ترند کاربرد داشته باشد. در [۱۹] نیز یک کنترلر فازی بهینه شده برای فرکانس ارائه شده است، اما عوامل غیرخطی در مدلسازی منابع در نظر گرفته نشده است.

در مراجع مختلف انواع مختلفی از کنترل‌کننده‌های فازی ارائه شده است. در [۲۰] یک نمونه از کنترل‌کننده فازی بهبود یافته ارائه شده است. این کنترل‌کننده با تغییر گسترده ضرایب کنترلی بر اساس تغییرات سیگنال‌های ورودی، پاسخ مناسبی ارائه می‌کند اما ضرایب آن برای عملکرد بهینه کنترل‌کننده تعیین نشده است.

در این مقاله از یک کنترل‌کننده فازی جدید جهت تنظیم سیستم کنترل توان اکتیو واحد اصلی استفاده شده است. مزیت کنترل‌کننده‌های فازی بر کنترل‌کننده‌های مرسوم مانند PID عملکرد مناسب‌تر آن‌ها در حضور عوامل غیرخطی است. کنترل‌کننده فازی جدید اگر چه دارای پاسخ مناسبی برای سیستم کنترل فرکانس در ریزشبکه است اما این عملکرد بهینه نیست. جهت دستیابی به عملکرد بهینه کنترل‌کننده فازی پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) استفاده شده است. در بخش دوم مقاله ساختار و مدل

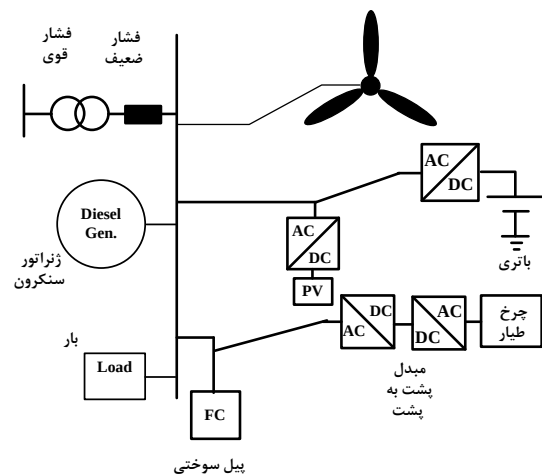
استفاده شده برای ریزشبه بیان شده است. در ریزشبه مورد مطالعه تمامی عوامل غیرخطی که رفتار ریزشبه را به رفتار سیستم واقعی نزدیک می‌کند، نیز در نظر گرفته شده‌اند. در بخش سوم مقاله ساختار کنترل‌کننده فازی مرسوم و پیشنهادی توضیح داده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها و نتایج آن در بخش چهارم ارائه شده است و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش آخر مقاله ارائه شده است.

۲- مدل سیستم مورد استفاده

شکل (۲) ساختار ریزشبه مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۲۱]. از آنجائیکه فرکانس، متغیری است که در کل سیستم مقداری یکسان دارد، کلیه بارها و تولیدات در یک باس مدل شده‌اند. ریزشبه مورد مطالعه دارای سطح ولتاژ توزیع (۴۰۰ ولت) است. پارامترهای H و D مدل‌کننده تأثیر بارها و لختی ریزشبه است.

ریزشبه مورد مطالعه دارای تولیدات تجدید پذیر مانند توربین باد و سلول‌های خورشیدی است. ویژگی این تولیدات عدم قطعیت آن هاست که باعث می‌شود توان تولیدی آن‌ها دارای مقادیر متغیر با زمان است. این دو منبع به همراه رابط الکترونیک قدرتشان به صورت یک تابع تبدیل با ثابت زمانی و بهره‌های K_{PV} , T_{PV} , K_{WTG} به ترتیب مدل شده‌اند.

در ساختار ریزشبه از پیل سوختی با دینامیک کند نیز استفاده شده است. تابع تبدیل این تولیدکننده به صورت ثابت زمانی و بهره سیستم تامین سوخت پیل با K_{AE} , T_{AE} و رابط الکترونیک قدرت با K_{FC} , T_{FC} است.

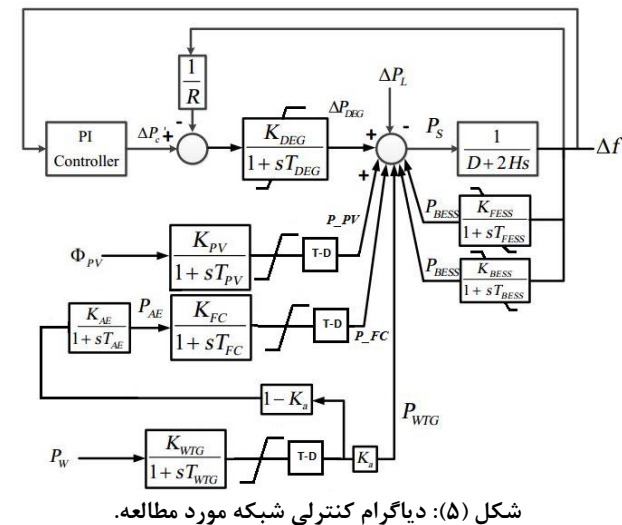
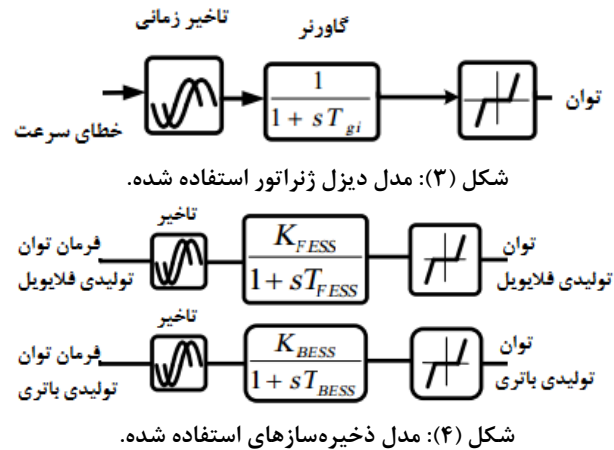


شکل (۲): ساختار ریزشبه مورد مطالعه.

همچنین باتری و ذخیره‌ساز چرخ طیار نیز در ریزشبه استفاده شده است. ذخیره‌ساز چرخ طیار به دلیل آنکه ساختار آن از تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی استفاده می‌کند، دارای سرعت بیشتری نسبت به باتری در پاسخگویی به تغییرات بار به‌خصوص در حالت دشارژ است. این دو ذخیره‌ساز با ثابت زمانی و بهره‌های متفاوت K_{FESS} , T_{FESS} و K_{BESS} , T_{BESS} مدل شده‌اند و $1/R$ هم بهره کنترل‌کننده آفتی را نشان می‌دهد.

برای واقعی‌تر شدن مدلسازی ذخیره‌سازها و دیزل ژنراتور نیز باندهای مرده‌ای قبل از تابع تبدیل شان قرار گرفته که نشان‌دهنده این است که تا اختلاف فرکانس به حد مورد نظر نرسد، در بهبود فرکانس نقشی ندارند و از طرفی در خروجی آن‌ها نیز بلوک‌های تأخیری در نظر گرفته شده است که مدل آن در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. مدل اصلی دیزل ژنراتور به همراه سیستم کنترلی در شکل ۵ نشان داده شده

بلوک دیاگرام مدل‌سازی کنترلی ریزشبه مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. اطلاعات با جزئیات بیشتر و دقیق‌تر در مورد مدل استفاده شده در ادامه، در مرجع شماره [۲۱] موجود است.



۳- کنترل‌کننده‌های مورد استفاده

۳-۱- کنترل‌کننده فازی

در این بخش به توضیح در مورد طراحی کنترل‌کننده انتگرالگیر-تناسبی فازی پرداخته شده است. به‌طورمعمول روش مرسوم برای طراحی کنترل‌کننده انتگرالگیر-تناسبی، روش زیگلر-نیگلز است که برای تنظیم کنترل‌کننده‌های P و PI و PID به کار می‌رود. برای دستیابی به پاسخی مناسب‌تر در حضور عوامل غیرخطی می‌توان از

قوانین منطق فازی استفاده نمود. یک سیستم فازی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است:

الف: بخش فازی ساز

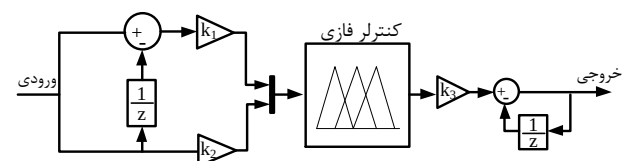
ب: بخش قوانین فازی مبنا

ج: بخش سیستم تصمیم گیری

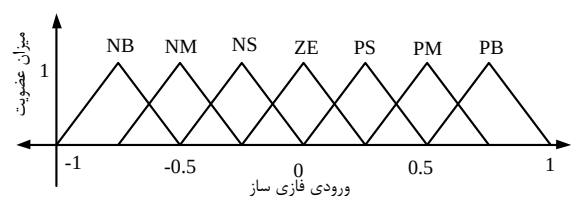
د: بخش فازی زدا

کنترل کننده فازی ابتدا ورودی های دریافتی را به صورت متغیرهای فازی تبدیل می کند و سپس بر اساس قوانین مبنا فازی خروجی ها را به صورت متغیرهای فازی می سازد و در نهایت در مکانیسم فازی زدا آن را به خروجی های قابل قبول برای سیستم تبدیل می کند.

کنترل کننده فازی PI مرسوم بر اساس تغییرات و مشتق تغییرات فرکانس عمل می کند. تغییرات فرکانس از مقدار مرجع و مشتق تغییرات فرکانس از مقدار مرجع به عنوان ورودی های کنترل کننده فازی PI مرسوم استفاده شده است. این مقادیر به مقادیر نرمالیزه تبدیل می شوند. شکل (۶) دیاگرام کنترل کننده فازی مرسوم را نشان می دهد که ضرایب K_1 و K_2 برای نرمالیزه کردن به کار رفته اند و K_3 ضریبی است برای تنظیم مقدار خروجی کنترل کننده که توان اکتیو تولیدی توسط دیزل ژنراتور است. در طراحی کنترل کننده فازی، توابع عضویت مثلثی و نرمال به کار رفته که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۶): بلوک دیاگرام کنترل کننده PI فازی به همراه نرمالیزه گره های ورودی.



شکل (۷): توابع عضویت فازی ساز نرمالیزه شده.

که در آن NB به معنی منفی بزرگ، NM به معنی منفی متوسط، NS به معنی منفی کوچک، ZE به معنی معادل صفر، PS به معنی مثبت کوچک، PM به معنی مثبت متوسط و PB به معنی مثبت بزرگ می باشد. عملکرد کنترل کننده فازی بر اساس گزاره های کنترلی جدول (۱) می باشد که در این جدول با مشخص بودن وضعیت خطای فرکانس و تغییرات خطای فرکانس، وضعیت خروجی نرمالیزه کنترل کننده فازی مشخص است. برای مثال اگر خطای فرکانس معادل صفر و تغییرات خطای فرکانس نیز معادل صفر بود، آنگاه خروجی کنترل کننده نیز باید معادل صفر باشد تا وضعیت مطلوب سیستم تغییری نکند که در ردیف چهارم ستون چهارم می توان همین نتیجه را

مشاهده کرد. این جدول متشکل از ۴۹ قانون اگر – آنگاه فازی است که برای شبیه سازی اهداف کنترلی یک کنترل کننده کلاسیک PI تنظیم شده است [۲۵-۲۲].

برای رسیدن به پاسخ بهینه عملکردی کنترل کننده PI فازی، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات یا همان PSO برای بهینه استفاده شده است تا کنترل کننده پیشنهادی بتواند تاثیر بهبودی خودش را نشان دهد. روش PSO در [۲۶-۲۷] بیان گردیده است. نحوه بهینه سازی ضرایب نرمالیزه گره ها و نرمالیزه زدا کنترل کننده پیشنهادی نیز به طور کامل در بخش بعد آورده شده است.

۳-۲- کنترل کننده فازی پیشنهادی

برای بهبود پاسخ کنترل کننده PI فازی سه اقدام در راستای هوشمندسازی کنترل کننده PI فازی اولیه انجام شده است که در زیر آورده شده است.

اقدام اول: یک سیستم خودتنظیم فازی در کنار کنترل کننده PI فازی قبلی طراحی شده است که متناسب با وضعیت خطای فرکانس و تغییرات خطای فرکانس، خروجی کنترل کننده PI فازی را در هر لحظه به صورت آنالاین بهبود می بخشد.

جدول (۱): قوانین فازی شبیه ساز اهداف کنترلی یک کنترل کننده PI کلاسیک

ΔF تغییرات	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	M	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PS	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

اقدام دوم: در ساختار جدید کنترل کننده ارائه شده، ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا K_1 و K_2 به صورت سعی و خطا تعیین نشده، بلکه با استفاده از الگوریتم هوشمند سازی ازدحام ذرات یا همان PSO، برای کمینه کردن تغییرات فرکانس بهینه شده اند.

اقدام سوم: برای عملکرد بهتر و مناسب کنترل کننده در شرایط مختلف تغییرات بار، یک سیستم فازی خودتنظیم دیگر نیز برای تنظیم خودکار ضرایب بهینه شده نرمالیزه گره های ورودی K_1 و K_2 طراحی شده است که متناسب با میزان تغییرات بار اعمالی به ریزشبه، ضرایب نرمالیزه گره های ورودی K_1 و K_2 به صورت خودکار بهبود می یابند. بلوک دیاگرام شکل (۸) به خوبی عملکرد کنترل کننده PI فازی هوشمند خودتنظیم پیشنهادی را نشان می دهد.

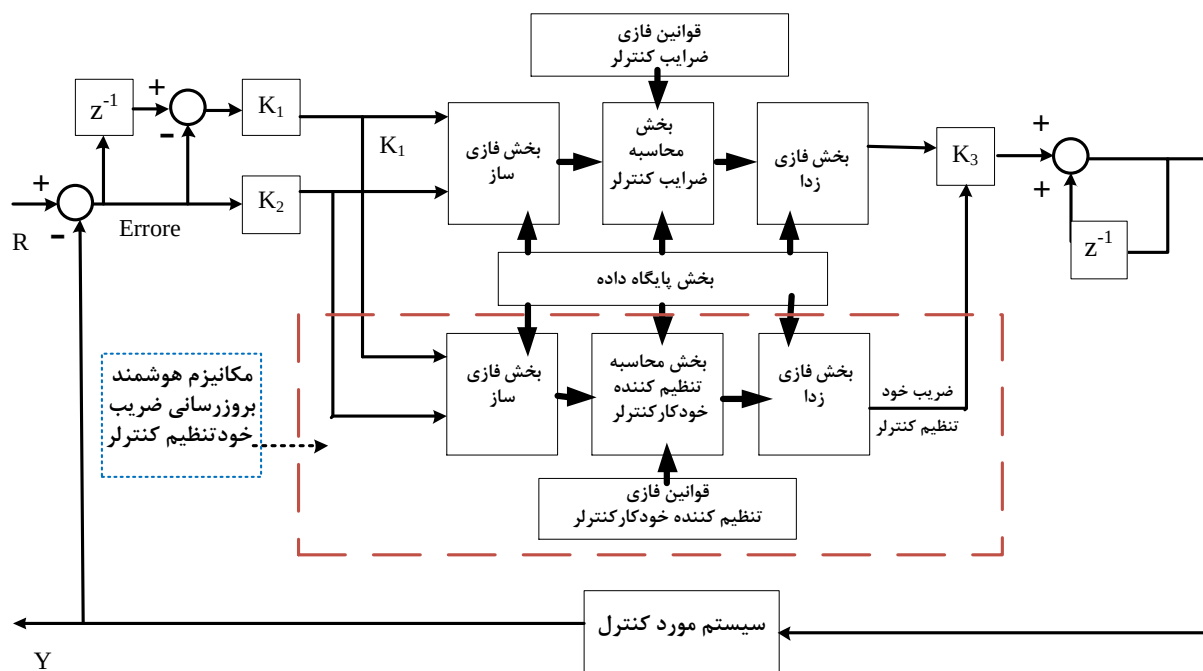
با استفاده از توابع عضویت نرمالیزه شده در شکل (۷) برای خطای فرکانس و تغییرات خطای فرکانس به عنوان بخش فازی ساز ورودی واحد خودتنظیم، قوانین اگر – آنگاه فازی به گونه ای که عملکرد کنترل کننده را در هر لحظه بهبود بخشند، در جدول (۲) نوشته شده

جدول (۲): جدول قوانین اگر - آنگاه فازی برای ضریب خودتنظیمی خروجی کنترلی کنترل کننده PI فازی پیشنهادی

ΔF تغییرات ΔF	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
NB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB
NM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
NS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
PM	VB	VB	B	B	MB	S	VS
PS	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE

است. همان طور که در جدول (۲) دیده می شود، به کمک ۴۹ قانون نوشته شده فازی در این جدول و توابع عضویت خروجی واحد خودتنظیم که در شکل (۹) قابل مشاهده است، واحد خودتنظیم خروجی کنترل کننده فازی تکمیل می شود.

در شکل (۹) توابع عضویت نرمالیزه مورد استفاده برای خروجی واحد خودتنظیم فازی آورده شده است. که در آن ZE به معنی معادل صفر VS، به معنی خیلی کوچک، S به معنی کوچک، SB به معنی کمی بزرگ، MB به معنی تا حدودی بزرگ، B به معنی بزرگ و VB به معنی خیلی بزرگ هست که تعبیر فازی نرمالیزه شده ضریب خودتنظیم را نشان می دهند.

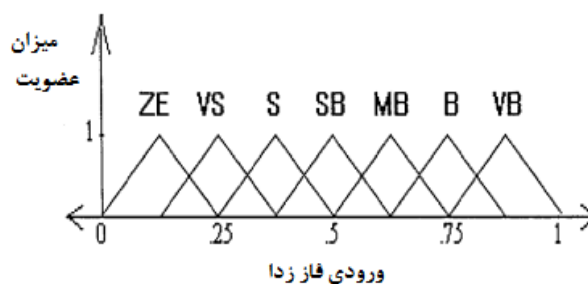


شکل (۸): ساختار نحوه خودتنظیمی خروجی کنترل کننده PI هوشمند پیشنهادی

وسط می پردازیم زمانی که خطای فرکانس نزدیک صفر است زمانی که تغییرات خطای فرکانس نیز کم است چه این تغییرات کم مثبت باشد و چه منفی، خروجی کنترل کننده باید خیلی تقویت شود و زمانی که تغییرات خطای فرکانس نیز متوسط و زیاد است چه این تغییرات مثبت باشد و چه منفی، باز هم به دلیل نبود خطای فرکانس، خروجی کنترل کننده نیز باید تقویت شود.

باید در نظر گرفت که برای اینکه خروجی کنترل کننده تقویت شود باید ضریب کنترل کننده بزرگتر شود ولی از طرفی میزان تقویت و تضعیف مورد نظر روی فضای نرمال بین [۰-۱] تعریف شده است بنابراین ضریب نرمالیزه زدای خروجی انتخابی در اینجا باید بزرگتر از حالت نبود آن باشد تا تقویت معنی داشته باشد که همانطور که در ادامه آورده شده است، این اتفاق افتاده است.

همان طور که گفته شد، تعیین ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدای فازی در عملکرد کلی کنترل کننده تاثیر زیادی دارد. از طرفی چون در این



شکل (۹): توابع عضویت نرمالیزه فازی زدای مورد استفاده برای خروجی واحد خودتنظیم

قوانین اگر-آنگاه نوشته شده در جدول (۲) به گونه ای طراحی شده است که خروجی کنترل کننده در جایی که نیاز است بزرگتر شود، تقویت کند و در جایی که نیاز است کوچکتر شود، تضعیف کند. از طرفی میزان تقویت و تضعیف مورد نظر روی فضای نرمال بین [۰-۱] تعریف شده است. برای مثال به توضیح قوانین نوشته شده در ستون

$$V_i^{(t+1)} = \omega V_i^{(t)} + c_1 \cdot \text{rand}_1(.) \cdot (Pbest_i - X_i^{(t)}) + c_2 \cdot \text{rand}_2(.) \cdot (Gbest - X_i^{(t)})$$

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + V_i^{(t+1)}$$

در رابطه فوق V_i سرعت اولیه هر ذره در فضای جستجو و X_i بردار مکانی هر ذره است. c_1 و c_2 ضرایب با مقادیر تصادفی هستند. P_{best} بردار مکانی بهترین نقطه پیدا شده توسط ذره i ام است و G_{best} بردار مکانی بهترین نقطه پیدا شده توسط کل جمعیت است.

c_1 و c_2 ضرایب یادگیری یا شتاب در بازه هستند. c_1 را پارامتر شناختی و c_2 را پارامتر اجتماعی میگویند و این ضرایب برابر ۲ در نظر گرفته شده اند. به این ترتیب الگوریتم PSO قادر است در تکرارهای متوالی نقطه بهینه سراسری تابع مورد نظر را پیدا کند.

۵- شبیه سازی ها

بلوک دیاگرام مدل ریزشبه مورد آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است که در آن تجمیع اثر تغییرات توان های تولیدی هر کدام از واحد های پراکنده و ذخیره ساز و میزان تغییرات بار مصرفی مصرف کنندگان در ریزشبه را بر روی تغییرات فرکانس در ریزشبه نشان می دهد و همچنین توان های نشان داده شده در شکل بیان گر تغییرات توان واحد ها نسبت به نقطه کاری خود می باشند. هر چند که در بیشتر مطالعات فرکانسی، از مدل های خطی جهت تحلیل رفتار سیستم استفاده می شود، اما برای بهبود مدل در نظر گرفته شده و نزدیک تر شدن به پاسخ واقعی ریزشبه، یک سری المان های غیرخطی مانند محدود کننده ها و تأخیرهای زمانی و باندهای مرده به مدل پاسخ فرکانسی اولیه اضافه شده که یکی از مهم ترین محدودیت های فیزیکی مربوط به ژنراتور دیزلی بوده، که در اثر محدودیت های مکانیکی و گرمایی، همیشه بین اتفاق افتادن اغتشاش و پاسخ به آن تأخیری وجود دارد. همچنین به دلیل وجود فیلترهای متفاوت و کانال های مخابراتی، در انتقال پارامترهای اندازه گیری شده به سیستم های کنترلی نیز تأخیری وجود دارد. پس به خاطر دلایل ذکر شده بلوک های تأخیری به مدل سیستم اضافه شده است. منابع تولید دارای باند مرده ای هستند که تا سیگنال ورودی کنترلی به این منابع، به حد مشخصی نرسد، فعال نخواهند شد. همچنین افزایش یا کاهش تولید دیزل ژنراتور نیز محدود است که در خروجی آن یک محدود کننده در نظر گرفته شده است. پس مدل در نظر گرفته شده در شکل (۵) برای ریزشبه مورد آزمایش با اضافه کردن بلوک های غیرخطی برای در نظر گرفتن محدودیت های ذکر شده، دقیق تر شده است. در شکل (۵) نحوه قرارگیری کنترل کننده نیز نمایش داده شده است که مانند کنترل کننده افتی دیزل به تنظیم توان لحظه ای آن کمک خواهد کرد. همچنین مقادیر پارامترهای مورد استفاده در ریزشبه مورد آزمایش در جدول (۳) آورده شده است. توضیحات بیشتر در مورد این پارامترها در [۲۰] بیان شده است.

کنترل کننده PI هوشمند پیشنهادی، بخش جدید خودتنظیم فازی نیز اضافه شده است، نیاز است تا ضرایب نرمالیزه گر ها و نرمالیزه زدای کنترل کننده پیشنهادی دوباره تغییر کنند که برای رسیدن به پاسخ بهینه، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات یا همان PSO استفاده شده است تا کنترل کننده پیشنهادی بتواند تاثیر بهبودی خودش را نشان دهد. نحوه بهینه سازی ضرایب نرمالیزه گر ها و نرمالیزه زدای کنترل کننده پیشنهادی نیز به طور کامل در ادامه آورده شده است. همچنین در ادامه برای تنظیم خودکار ضرایب ورودی کنترل کننده PI فازی هوشمند پیشنهادی، یک سیستم فازی طراحی شده است تا ضرایب نرمالیزه گر ورودی کنترل کننده پیشنهادی نیز مانند ضریب خروجی آن، خودتنظیم و هوشمند باشد. برای این کار متناسب با میزان تغییرات بار مصرف کنندگان در ریزشبه، ضرایب نرمالیزه گر ورودی کنترل کننده پیشنهادی یعنی همان K_1 و K_2 به صورت خودکار تنظیم خواهند شد که نحوه انجام این کار نیز در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴- الگوریتم PSO

پیاده سازی این الگوریتم نسبت به بسیاری از الگوریتم های تکاملی راحت تر بوده و سرعت همگرایی آن بیشتر است. در این روش، هر پلسخ احتمالی برای مساله، یک پرند در فضای جستجو است که ذره نام دارد. هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی مساله به دست می آید. پرند ای که به غذا نزدیکتر است، شایستگی بیشتری دارد. این روش مانند اکثر روش های جستجوی تکاملی، با یک گروه از جواب های تصادفی (ذره ها) جستجو را به شکل موازی شروع می کند و سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مساله، با به هنگام کردن مکان ذره ها، به جستجو ادامه می دهد. مکان هر ذره در هر تکرار متأثر از دو عامل است. اولین عامل، بهترین موقعیتی است که این ذره تا کنون کسب کرده است و تحت عنوان P_{best} است و دومین عامل بهترین موقعیتی است که تا به حال در همسایگی این ذره کسب شده است و تحت عنوان G_{best} است. موقعیت هر ذره بر اساس این دو عامل به هنگام می شود. به عبارت دیگر اعضای جمعیت از طرفی موظفند موقعیت خود را با تبعیت از بهترین عضو جمعیت، در یک شعاع همسایگی، تغییر دهند و از طرف دیگر لازم است بهترین موقعیتی را که تا کنون شخصا تجربه کرده اند در حافظه خود نگهداری کرده و تمایلی نیز به سمت آن داشته باشند. این الگوریتم برای پیاده سازی مفهوم فوق از دو متغیر سرعت و مکان استفاده می کند. به عبارتی مکان جدید هر ذره با توجه به سرعت آن به دست خواهد آمد.

در روش PSO، برای هر ذره i ، یک موقعیت X_i و یک سرعت V_i در نظر گرفته می شود. اساس روش PSO در معادله (۱) نشان داده شده است.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای ریزشبه مورد شبیه سازی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۴	$T_{FC}(s)$	۰/۰۱۲	D
۳	R	۰/۲	$\gamma H(s)$
۲	$T_{DEG}(s)$	۰/۱	$T_{FESS}(s)$
۱/۵	$T_{WTG}(s)$	۰/۱	$T_{BESS}(s)$
۱/۸	T_{PV}	۰/۵	T_{AE}
۱	K_{WTG}	۰/۶	K_n
۱	K_{PV}	-۰۰۳۳۳۰	K_{DEG}
۰/۰۱	K_{FC}	-۰/۰۰۳۳۳	K_{BESS}
۰/۰۰۲	K_{AE}	-۰/۰۰۱	K_{FESS}
۵۰ms	تاخیر	۰/۰۷	T_{gi}

در ادامه سناریوهای متفاوتی طراحی شده و پاسخ کنترل کننده-ها برای هر سناریو در حالت تغییرات ناگهانی بزرگ افزایشی و کاهش بار مصرف کنندگان در ریزشبه با یکدیگر مقایسه شده است که تاثیر عوامل غیرخطی نیز بررسی شده است. شبیه سازی ها در محیط MATLAB/Simulink انجام شده است. در تمام سناریوها پاسخ کنترل کننده PI معمولی با کنترل کننده PI فازی کلاسیک و کنترلر PI فازی بهینه شده و خودتنظیم هوشمند پیشنهادی مقایسه شده است.

به منظور مقایسه نتایج عملکرد کنترل کننده های مورد نظر در حالات مختلف اندیس عملکردی میزان انتگرال انحراف فرکانس ریزشبه از میزان نامی خود (۵۰ HZ)، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\int \Delta f dt = \int |f - 50| dt \quad (2)$$

همچنین در تمام سناریوها، میزان رشد اندیس عملکردی انتگرالی فوق نیز برای کنترل کننده های مورد نظر نشان داده شده است و مشاهده می شود که میزان رشد اندیس عملکردی انتگرالی فوق، در حالتی که از کنترل کننده PI فازی بهینه شده و هوشمند خودتنظیم پیشنهادی استفاده شده است، به مراتب کمتر از دو کنترل کننده دیگر است. در ادامه ضرایب و اقدامات مورد نیاز بدست آمده از طراحی کنترل کننده های مختلف با روش های توضیح داده شده در قبل برای کنترلرهای مختلف نیز آورده شده است.

۵-۱- کنترل کننده PI کلاسیک

ضرایب مناسب کنترل کننده PI کلاسیک که با استفاده روش زیگلر-نیکولز و با اعمال تنظیمات دستی متناسب با محدودیت های غیرخطی موجود و شرایط مختلف کاری بدست آمده، در جدول (۴) آورده شده است.

۵-۲- کنترل کننده PI فازی کلاسیک

کنترل کننده PI فازی کلاسیک مورد استفاده که ساختار و تمام جزئیات آن در بخش های قبل بیان شده است، نیاز به تعیین ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا برای عملکرد صحیح خود می باشد که سعی شده تا آنجا که ممکن است، این ضرایب به صورت دستی و با روش

سعی و خطا برای عملکرد مناسب کنترل کننده PI فازی متناسب با شرایط مختلف کاری تعیین شود که ضرایب نرمالیزه گر K_1 و K_2 و ضریب نرمالیزه زدا K_3 بدست آمده، در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۴): ضرایب کنترل کننده PI کلاسیک

K_p	K_i
۸۷/۵	۱۷/۸

جدول (۵): ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا ی کنترلر PI فازی کلاسیک

K_1	K_2	K_3
۰/۰۸۱۷	۳۱/۲۹	۴/۸۰۶

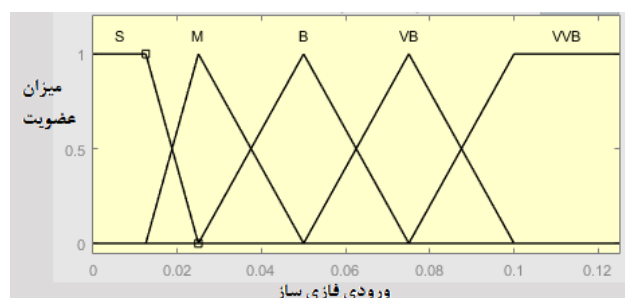
۵-۳- کنترل کننده PI فازی بهینه و خودتنظیم هوشمند پیشنهادی

کنترل کننده PI فازی هوشمند پیشنهادی که ساختار آن نیز به طور کامل در بخش های قبل آورده شده است، نیاز به تعیین ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا برای عملکرد صحیح خود می باشد که در اینجا برای رسیدن به پاسخ بهینه از الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات یا همان PSO استفاده شده است که در فایل MATLAB/Simulink با اعمال تغییرات ۰/۱ پریونیت بار و با استفاده از کمینه کردن معیار رابطه (۱)، ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا ی بهینه در جدول (۶) آورده شده است.

جدول (۶): ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدا ی بهینه شده برای کنترلر PI هوشمند پیشنهادی

K_1	K_2	K_3
۰/۰۴۴۲	۳۰	۱۶/۸۹

با توجه به اینکه ساختار کنترل کننده پیشنهادی به گونه ای است که ضریب نرمالیزه زدا ی خروجی کنترل کننده (K_3) را به صورت خودکار متناسب با تغییرات فرکانس بهبود می دهد، برای بهبود عملکرد کنترل کننده در میزان تغییرات متفاوت بار، یک سیستم فازی طراحی شده تا ضرایب نرمالیزه گر K_1 و K_2 نیز متناسب با تغییرات بار، بهبود یابند که توابع عضویت و جدول قوانین سیستم فازی استفاده شده برای این منظور به صورت زیر در شکل های (۱۰ تا ۱۲) آورده شده است.



شکل (۱۰): توابع عضویت فازی ساز تغییرات بار بر حسب پریونیت

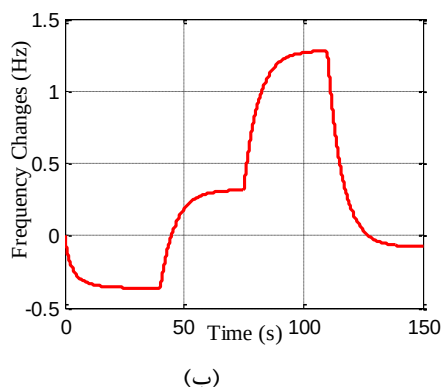
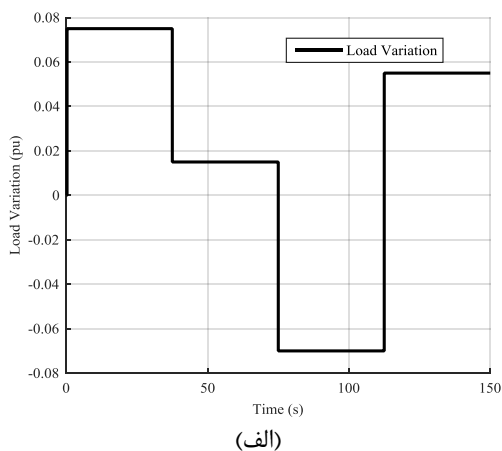
کدام در بازه معقول متغیر باشند و در صورت حضور باندهای مرده با تاخیر ۵۰ میلی ثانیه (برابر ۲/۵ سیکل) وجود دارند، بررسی شده است که در این حالت کنترل کننده نیز باید بتواند در حضور تغییرات شرایط جوی مانند سرعت باد و میزان تابش خورشید و حضور عوامل غیرخطی مقاوم باشد.

۵-۴-۱- سناریو اول

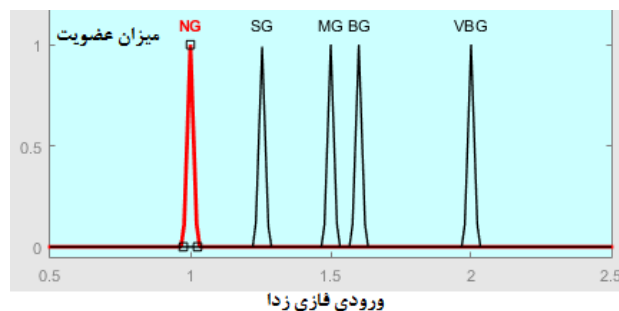
نتایج بدست آمده در صورت حضور تغییرات ناگهانی کاهش و افزایش بار مصرف کنندگان که توان تولیدی توربین بادی و خورشیدی ثابت باشند و باندهای مرده و بلوک‌های تاخیر حضور ندارند، در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) آمده است. همچنین تمام مقادیر توان‌های تولیدی و مصرفی واحدها برحسب پریونیت هستند.

شکل (۱۳) تغییرات بار را به صورت پله‌ای نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت واحدها تغییرات پله‌ای به گونه‌ای ایجاد شده که تغییرات فرکانس قابل توجهی ایجاد کند.

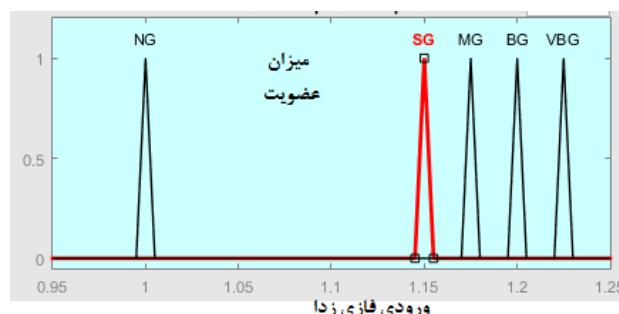
شکل (۱۴) نیز نحوه تغییرات اندیس عملکردی تعریف شده در رابطه (۱) را برای سه روش مورد استفاده نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است کنترل کننده پیشنهادی فازی دارای کمترین میزان تغییرات اندیس عملکردی می باشد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن است.



شکل (۱۳): الف: تغییرات ناگهانی افزایشی و کاهش بار، ب: تغییر فرکانس بدون کنترل کننده.



شکل (۱۱): توابع عضویت فازی زدای ضریب ضرب شونده در نرمالیزه گر K_1



شکل (۱۲): توابع عضویت فازی زدای ضریب ضرب شونده در نرمالیزه گر K_2

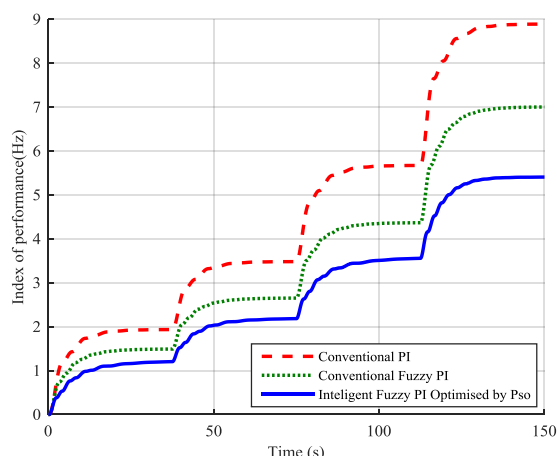
با استفاده از توابع عضویت مثلثی شکل استفاده شده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، که در آن، تعبیر کیفی بهره‌های ضرب شونده، با تعبیری چون NG به معنی بدون تغییر، SG به معنی بهره تقویتی کوچک، MG به معنی بهره تقویتی متوسط، BG به معنی بهره تقویتی بزرگ و VBG به معنی بهره تقویتی خیلی بزرگ، کمی شده‌اند و همچنین با استفاده از جدول قوانین فازی که در زیر آورده شده است، برای تغییرات متفاوت بار مصرف کنندگان در ریز شبکه، بهره‌های متفاوتی برای ضرایب نرمالیزه گر K_1 و K_2 در نظر گرفته شده است تا بتواند هوشمندی بیشتری به کنترل کننده بدهد و پاسخ مناسب‌تر و بهینه‌تری در شرایط مختلف کاری از آن دیده شود.

جدول (۷): قوانین فازی رابط بین توابع عضویت فازی ساز تغییرات بار و توابع عضویت فازی زدای نرمالیزه گر

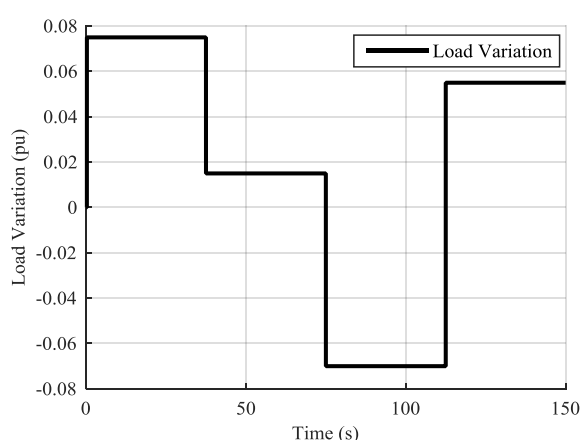
تغییرات بار / بهره ضرب شونده در	S	M	B	VB	VVB
نرمالیزه گر K_1	VBG	BG	MG	SG	NG
نرمالیزه گر K_2	VBG	BG	MG	SG	NG

۵-۴- سناریو های شبیه سازی

در سناریوی اول، نتایج به دست آمده در حالت عدم حضور باندهای مرده و تاخیر به صورت زیر آورده شده است. همچنین نتایج به دست آمده در این حالت با فرض اینکه توان تولیدی توربین باد و سلول‌های خورشیدی ثابت است، بیان شده است و سپس در سناریو دوم در حالتی که توان تولیدی توربین بادی و سلول خورشیدی هر



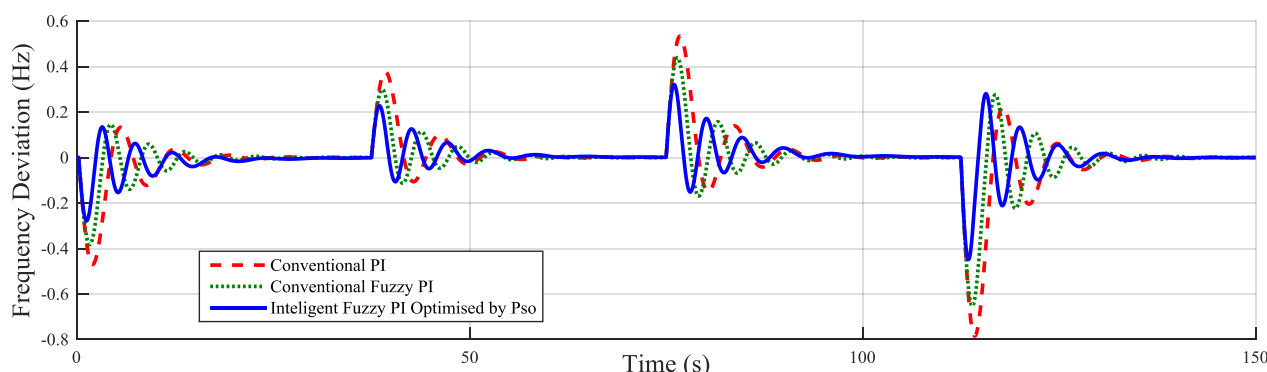
شکل (۱۴): تغییرات اندیس عملکردی در سناریو اول.



شکل (۱۶): تغییرات ناگهانی افزایشی و کاهش بار در ریز شبکه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل کننده پیشنهادی بر روی واحد ژنراتور دیزل، خروجی تولیدی آن را تغییر داده و به کنترل فرکانس در ریز شبکه که اغلب دارای مشکلاتی مانند اینرسی کم منابع بود، می پردازد.



شکل (۱۵): تغییرات فرکانس حول مقدار نامی خود در سناریو اول در تغییرات ناگهانی افزایشی و کاهش بار مصرف کنندگان

در نهایت شکل (۱۵) نیز منحنی فرکانس شبکه را در اثر تغییرات بار نشان می دهد که در این شکل نیز مشاهده می شود که کنترل کننده پیشنهادی پاسخ مناسبی هم از نظر کم کردن بیشینه تغییرات فرکانس و هم از نظر بازیابی فرکانس در زمان کمتر دارای بهترین پاسخ است.

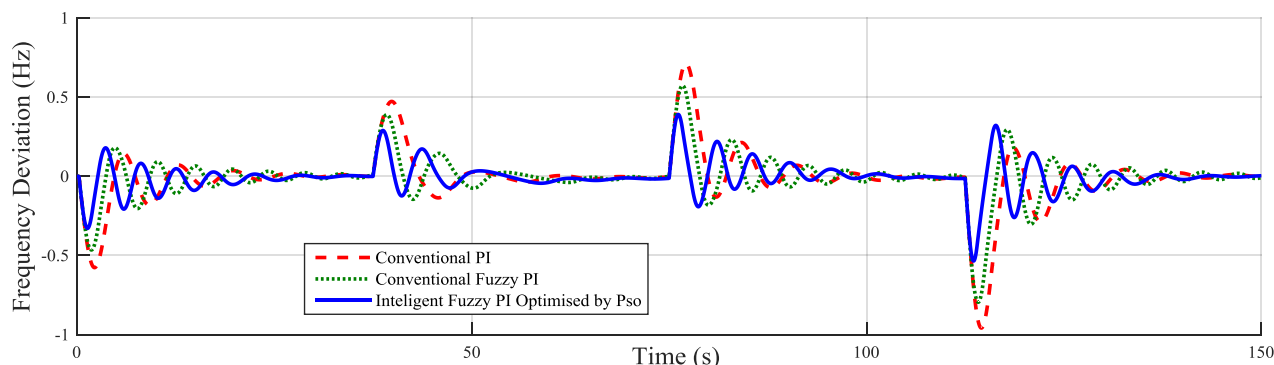
۵-۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو نتایج به دست آمده در حضور تغییرات ناگهانی کاهشی و افزایشی بار مصرف کنندگان و تغییرات توان تولیدی توربین بادی و سلول خورشیدی در بازه معقول در حضور عوامل غیر خطی مانند باندهای مرده و تاخیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت کنترل کننده ها نیز باید بتواند در حضور تغییرات شرایط جوی مانند سرعت باد و میزان تابش خورشید مقاوم باشند. در اینجا چون تغییرات بزرگ بار داریم، تغییرات توان توربین بادی و سلول خورشیدی نیز چند برابر شده است تا به عنوان اغتشاش، قابل مقایسه با تغییرات بزرگ بار باشند.

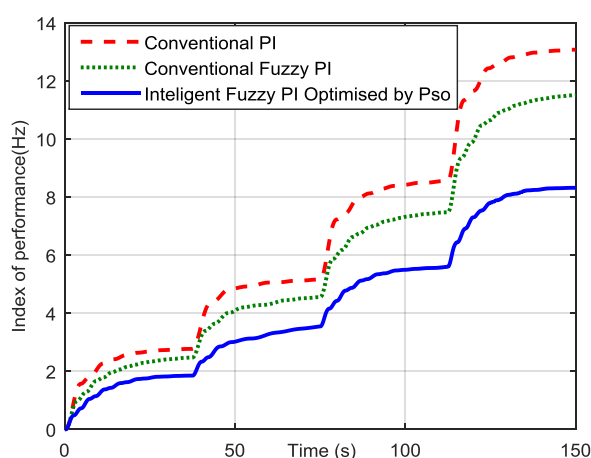
شکل (۱۶) تغییرات بار را به صورت پله ای نشان می دهد که همانند سناریوی قبل با توجه به ظرفیت واحدها تغییرات پله ای به گونه ای ایجاد شده که تغییرات فرکانس قابل توجهی ایجاد کند. همچنین تغییرات تصادفی تولیدات تجدید پذیر بادی و خورشیدی نیز در شکل (۱۷) آمده است. با توجه به اینکه این شکل تغییرات تولیدی را نشان می دهد، می تواند عددی منفی باشد.

شکل (۱۸) نیز تغییرات اندیس عملکردی تعریف شده در رابطه (۱) را برای سه روش مورد استفاده نشان می دهد. همانطور که مشخص است کنترل کننده پیشنهادی فازی دارای کمترین میزان تغییرات اندیس عملکردی می باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب آن است.

در نهایت شکل (۱۹) نیز منحنی تغییرات فرکانس شبکه را در اثر تغییرات بار نشان می دهد که در این شکل نیز مشاهده می شود که کنترل کننده پیشنهادی پاسخ مناسبی هم از نظر کم کردن بیشینه تغییرات فرکانس و هم از نظر کاهش زمان بازیابی فرکانس، دارای بهترین پاسخ است.



شکل (۱۹): تغییرات فرکانس حول مقدار نامی خود در سناریو دوم در تغییرات ناگهانی بار

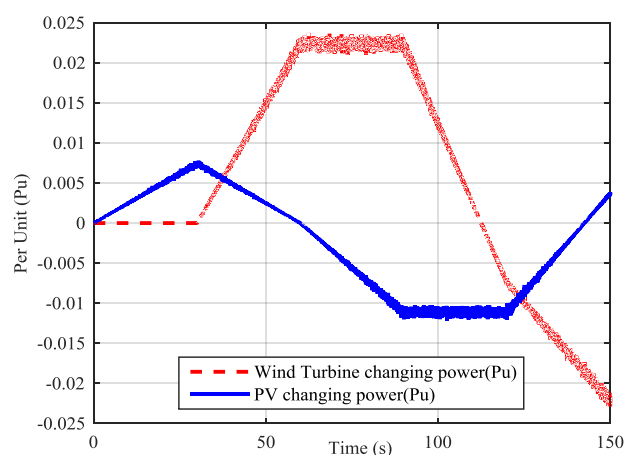


شکل (۱۸): تغییرات اندیس عملکردی در سناریو دوم.

همچنین در این مقاله یک کنترل کننده PI فازی هوشمند طراحی شده است که عملکردی کاملاً فازی دارد و کنترل کننده فازی هوشمند طراحی شده دارای ساختار هوشمندی است که قابل اعمال بر سایر سیستم‌ها نیز می باشد. در این مقاله هدف کنترل فرکانس ریزشکبه بوده است. با توجه به اینکه ریزشکبه مورد نظر شامل عوامل غیرخطی است که رفتار سیستم را هرچه بیشتر به رفتار واقعی آن نزدیک تر می کند، ریزشکبه ماهیت غیرخطی دارد و به همین دلیل از کنترل کننده فازی که عملکرد بهتری در شرایط غیرخطی دارد، استفاده شده است. در نهایت ضرایب بهینه برای کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم PSO به دست آمد است. نتایج شبیه سازی‌ها شامل تغییرات فرکانس و تغییرات اندیس انتگرالی انحراف فرکانس، عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی را نشان می دهد.

مراجع

- [1] L. Qu, W. Qiao, "Constant power control of DFIG wind turbines with super capacitor energy storage", IEEE Transactions on Industry Applications 47 (January/February (1)) (2011) 359–367.
- [2] F. Hardan, J. A. M. Bleijs, R. Jones and P. Bromley, "Bi-Directional Power Control for Flywheel Energy Storage System with Vector-Controlled Induction Machine Drive," Proceedings of IEE Conference Publication, Institution of Electrical Engineers, No. 456, 1998, pp. 456-477.
- [3] G. Cimuca, M. M. Radulescu, C. Saudemont and B. Robyns, "DTC vs FOC of an IM-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator," Proceedings of the 8th International Conference on Modeling and Simulation of electrical Machine, Converters and Systems, Hammamet, 17-20 April 2005, CD-ROM.
- [4] L. Jerbi, L. Krichen and A. Ouali, "A Fuzzy Logic Supervisor for Active and Reactive Power Control of a Variable Speed Wind Energy Conversion System Associated to a Flywheel Storage System," Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 6, 2009, pp. 919-925.
- [5] R. Cárdenas, R. Peña, G. Asher, and J. Clare, "Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector controlled induction machine," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 48, pp. 625–635, June 2001.



شکل (۱۷): تغییرات توان تولیدی توربین بادی و سلول

[25] Mudi, Rajani K., and Nikhil R. Pal. "A robust self-tuning scheme for PI-and PD-type fuzzy controllers." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 7, no. 1 (1999): 2-16.

[۲۶] جورابی، افضلان، "حل مسئله پخش بار بهینه در شرایط نرمال و اضطراری با استفاده از الگوریتم ترکیبی گروه ذرات و نلدر مید (PSO-NM)" مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲ شماره اول بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[۲۷] همی، کوفیگر، عطایی، "کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نرمالیزه شده برای UPFC"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲ شماره اول بهار و تابستان ۱۳۹۴.

- [6] R. Hebner and A. Walls, "Flywheel batteries come around again," *IEEE Spectr.*, vol. 39, pp. 46–51, Apr. 2002.
- [7] S. Mohamad Alizadeh, M. Saeedmanesh, A. Rahimi-Kian, E. Jalalabadi, "Real-Time Frequency and Voltage Control. of an Islanded Mode Microgrid", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* - Vol.12, No.3, Winter 2015.
- [8] A.xiang Rong and B.Wang xiaoru, "operation control of flywheel energy storage system with wind farm" 30th Chinese control conference, Yantai, china, july 22-24, 2011.
- [9] R. Lasseter, "MicroGrids", *Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 1, No., pp. 305- 308, 2002.
- [10] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, L. Vandevelde, "A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage".
- [11] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems", *Industry Applications, IEEE Transactions on* , Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, 1993.
- [12] Y. W. Li, C. N. Kao, "An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid", *Power Electronics, IEEE Transactions on* , Vol. 24, No. 12, pp. 2977-2988, 2009.
- [13] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems", *Power Electronics, IEEE Transactions on* , Vol. 19, No. 5, pp. 1205- 1213, 2004.
- [14] M. E. El-Hawary, "Electric power Application of fuzzy system," *Wiley-IEEE Press*, 1998.
- [15] Bevrani, Hassan, Mohammad Ramin Feizi, and Sirwan Ataee. "Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: and-Synthesis Approaches." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7, no. 2 (2016): 706-717.
- [16] Khalghani, Mohammad Reza, Mohammad Hassan Khooban, Esmail Mahboubi-Moghaddam, Navid Vafamand, and Mohammad Goodarzi. "A self-tuning load frequency control strategy for microgrids: Human brain emotional learning." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 75 (2016): 311-319.
- [17] Khooban, Mohammad-Hassan, Taher Niknam, Frede Blaabjerg, Pooya Davari, and Tomislav Dragicevic. "A robust adaptive load frequency control for micro-grids." *ISA transactions* (2016).
- [18] Obaid, Zeyad Assi, L. M. Cipcigan, and Mazin T. Muhssin. "Fuzzy hierarchal approach-based optimal frequency control in the Great Britain power system." *Electric Power Systems Research* 141 (2016): 529-537.
- [19] Bevrani, H., F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani. "Intelligent frequency control in an ac microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach." *IEEE transactions on smart grid* 3, no. 4 (2012): 1935-1944.
- [20] Mudi RK, Pal NR. A self-tuning fuzzy PI controller. *Fuzzy sets and systems*. 2000 Oct 16;115(2):327-38.
- [21] Lee DJ, Wang L. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. 2008 Mar;23(1):311-20.
- [22] Dirankov, D., H. Hellendron, and M. Reinfrank. "An Introduction to Fuzzy Control Springer." New York (1993).
- [23] Li, Han-Xiong, and H. B. Gatland. "Conventional fuzzy control and its enhancement." *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on* 26, no. 5 (1996): 791-797.
- [24] Mudi, Rajani K., and Nikhil R. Pal. "A self-tuning fuzzy PI controller." *Fuzzy sets and systems* 115, no. 2 (2000): 327-338.