ارائه یک کنترل‌کننده هوشمند فازی خودتنظیم بهینه شده جهت بهبود کنترل فرکانس ریزشبکه با استفاده از الگوریتم PSO در حضور عوامل غیرخطی

امیرحسین ناظری اردکانی[۱] علی اصغر خدادوست آرانی[۲] محمد باقر منهاج[۳] مهدی کراری[۴]

۱- دانش‌آموخته 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 ریزشبکه نمونه مستقل از شبکه اصلی را روی تغییرات فرکانس نشان می‌دهد، استفاده شده است و برای واقعی‌تر شدن مدل پاسخ فرکانسی مورد نظر، عوامل غیرخطی مانند بلوک‌های تاخیر زمانی و باندهای مرده و محدودکننده‌هایی نیز به مدل مورد نظر اضافه شده است. برای حفظ فرکانس در مقدار نامی خود از یک کنترل‌کننده قبل از دیزل ژنراتور استفاده شده است تا بتواند توان خروجی دیزل را متناسب با تغییرات افزایشی و کاهشی بار مصرف‌کنندگان که به‌صورت پله‌ای و ناگهانی رخ می‌دهد، به‌خوبی تنظیم نماید. ابتدا یک کنترل کننده PI کلاسیک برای ژنراتور دیزل طراحی شده است. برای بهبود کنترل فرکانس در حضور عوامل غیرخطی، یک کنترل‌کننده PI فازی برای ریزشبکه طراحی شده تا عملکرد نسبتا مناسب‌تری 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 به‌صورت آنلاین بروز کند تا عملکرد به‌مراتب بهتری را نسبت به دو کنترل کننده قبل داشته باشد. همچنین پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده PI فازی در اینجا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه شده است تا بتوان به پاسخ بهینه کنترل کننده PI فازی دست یافت. نتایج شبیه‌سازی‌ها، کارایی کنترل کننده هوشمند فازی پیشنهادی طراحی شده را در شرایط مختلف عملکردی ریزشبکه به‌خوبی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترل کننده فازی هوشمند خودتنظیم، فرکانس، ریزشبکه، PSO، عوامل غیرخطی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: علی اصغرخدادوست آرانی

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]

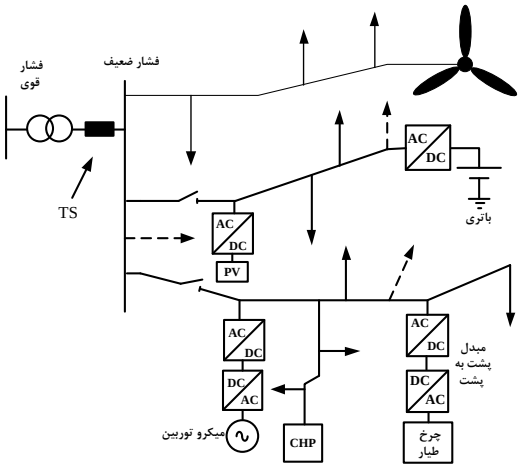
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

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 تجدید پذیر 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 نایقینی هایی 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 ریزشبکه ها را توسعه داده است. ریزشبکه ها 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 ریزشبکه ها 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 معمولا 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 ریزشبکه ها 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 می کند تا تغییرات بار را جبران کند [۸].

در چنین شرایطی برای کنترل ثانویه فرکانس (کنترل اتوماتیک تولید) باید فرکانس بی‌باری درروش افتی افزایش یابد. کنترل‌کننده‌ی که استفاده می‌شود، معمولا 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 ریزشبکه ها بر اساس روش های کنترل مقاوم استفاده شده است. در [۱۶] یک کنترلر خودتنظیم بر گرفته از رفتارات احساسی انسان برای کنترلر فرکانس در ریزشبکه ها 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 می تواند برای توپولوژی های مختلف شبکه به کار می رود. در [۱۸] نیز یک کنترلر فازی بهینه با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی برای بکه قدرت بریتانیا تهیه شده است. اما لزوما کنترلر مورد استفاده برای یک شبکه بزرگ قدرت نمی تواند در ریزشبکه ها 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 سیگنال های 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]

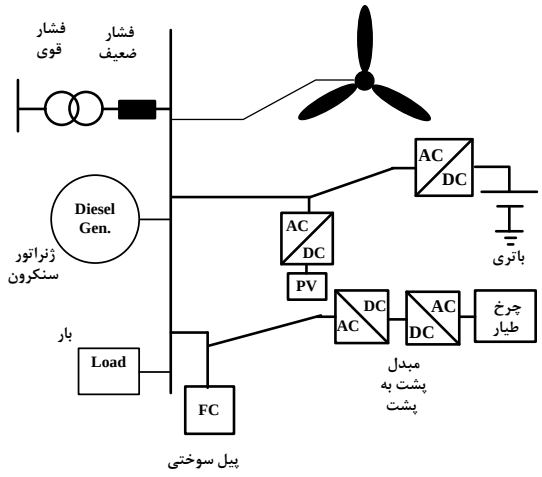
استفاده شده برای ریزشبکه بیان شده است. در ریزشبکه مورد مطالعه تمامی عوامل غیرخطی که رفتار ریزشبکه را به رفتار سیستم واقعی نزدیک می‌کنند، نیز در نظر گرفته‌شده‌اند. در بخش سوم مقاله ساختار کنترل‌کننده فازی مرسوم و پیشنهادی توضیح داده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها و نتایج آن در بخش چهارم ارائه شده است و در نهایت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

۲- مدل سیستم مورداستفاده

شکل (۲) ساختار ریزشبکه 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. ریزشبکه مورد مطالعه دارای سطح ولتاژ توزیع (۴۰۰ ولت) است. پارامترهای D و H مدل کننده تاثیر بارها و لختی ریزشبکه است.

ریزشبکه 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 بهره های T_{PV}، T_{WTG}، K_{PV}و K_{WTG} به ترتیب مدل شده اند.

در ساختار ریزشبکه 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 T_{AE}، K_{AE} و رابط الکترونیک قدرت با T_{FC}، K_{FC} است.

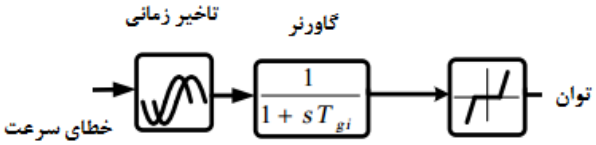


شکل (۲): ساختار ریزشبکه مورد مطالعه.

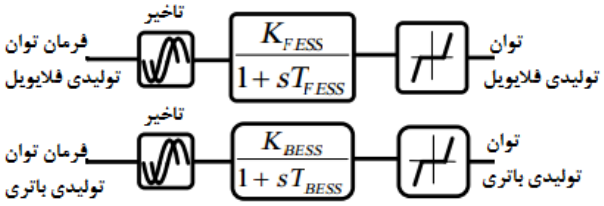
همچنین باتری و ذخیره‌ساز چرخ طیار نیز در ریزشبکه استفاده شده است. ذخیره‌ساز چرخ طیار به دلیل آنکه ساختار آن از تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی استفاده می‌کند، دارای سرعت بیشتری نسبت به باتری در پاسخگویی به تغییرات بار به‌خصوص در حالت دشارژ است. این دو ذخیره ساز با ثابت زمانی و بهره های متفاوت T_{FESS}، K_{FESS} و T_{BESS}، K_{BESS} مدل شده اند و 1/R هم بهره کنترل کننده افتی را نشان می دهد.

برای واقعی‌تر شدن مدلسازی ذخیره‌سازها و دیزل ژنراتور نیز باندهای مرده‌ای قبل از تابع تبدیل شان قرارگرفته 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 تاخیری در نظر گرفته شده است که مدل آن در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده‌شده است. مدل اصلی دیزل ژنراتور به همراه سیستم کنترلی در شکل ۵ نشان داده شده

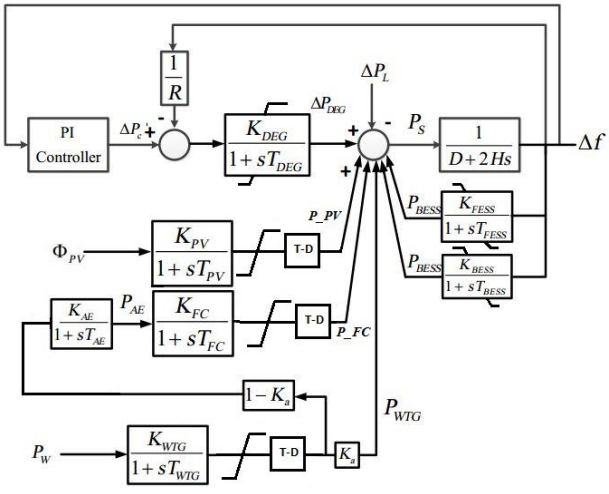
بلوک دیاگرام مدل‌سازی کنترلی ریزشبکه مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده‌شده است. اطلاعات با جزئیات بیشتر و دقیق‌تر در مورد مدل استفاده شده در ادامه، در مرجع شماره [۲۱] موجود است.



شکل (۳): مدل دیزل ژنراتور استفاده شده.



شکل (۴): مدل ذخیره‌سازهای استفاده شده.



شکل (۵): دیاگرام کنترلی شبکه مورد مطالعه.

۳- کنترل‌کننده‌های مورداستفاده

۳-۱- کنترل‌کننده فازی

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

قوانین منطق فازی استفاده نمود. یک سیستم فـازی از چهـار قسـمت اصلی تشکیل شده است:

الف: بخش فازی ساز

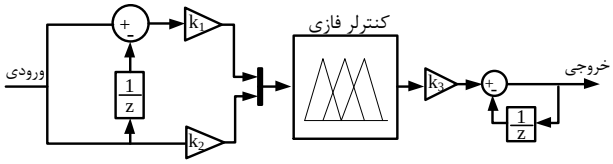
ب: بخش قوانین فازی مبنا

ج: بخش سیستم تصمیم‌گیری

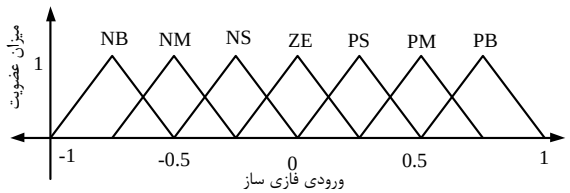
د: بخش فازی زدا

کنتـرل‌کننـده فـازی ابتـدا ورودی‌هـای دریـافتی را بـه‌صـورت متغیرهای فازی تبدیل می‌کند و سپس بر اساس قوانین مبنـای فـازی خروجی‌هـا را بـه‌صـورت متغیرهـای فـازی مـی‌سـازد و در نهایـت در مکانیسم فازی زدا آن را به خروجی‌های قابل قبول برای سیستم تبدیل می‌کند.

کنترل‌کننده فازی PI مرسوم بر اساس تغییرات و مشتق تغییرات فرکانس عمل مـی‌کنـد. تغییـرات فرکـانس از مقـدار مرجـع و مشـتق تغییرات فرکانس از مقدار مرجع به عنـوان ورودی‌هـای کنتـرل‌کننـده فازی PI مرسوم استفاده شده است. ایـن مقـادیر بـه مقـادیر نرمـالیزه تبدیل می شوند. شکل (۶) دیاگرام کنترل‌کننده فازی مرسوم را نشـان می‌دهد که ضرایب K_1 و K_2 برای نرمالیزه کردن بـه‌کاررفتـه‌انـد و K_3 ضریبی است برای تنظیم مقدار خروجی کنترل‌کننده کـه تـوان اکتیـو تولیدی توسط دیزل ژنراتوراست. در طراحی کنترل‌کننده فازی ، توابع عضویت مثلثی و نرمال به‌کاررفتـه کـه در شـکل (۷) نشـان داده‌شـده است.



شکل (۶): بلوک دیاگرام کنترل‌کننده PI فازی به همراه نرمالیزه گرهای ورودی.



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

که در آن NB به معنی منفی بزرگ ،NM بـه معنـی منفـی متوسـط، NS به معنی منفی کوچک، ZE به معنی معادل صـفر، PS بـه معنـی مثبت کوچک، PM به معنی مثبـت متوسـط و PB بـه معنـی مثبـت بزرگ می باشد. عملکرد کنترل‌کننده فازی بر اساس گزاره‌های کنترلی جدول (۱) می باشد که در این جدول با مشخص بودن وضعیت خطای فرکـانس و تغییـرات خطـای فرکـانس، وضـعیت خروجـی نرمـالیزه کنترل‌کننده فازی مشخص است. برای مثال اگر خطای فرکانس معادل صفر و تغییرات خطای فرکانس نیز معادل صـفر بـود ، آنگـاه خروجـی کنترل‌کننده نیز باید معادل صفر باشـد تـا وضـعیت مطلـوب سیسـتم تغییری نکند که در ردیف چهارم ستون چهارم می‌توان همین نتیجه را مشاهده کرد. این جدول متشکل از ۴۹ قانون اگر – آنگاه فازی اسـت که برای شبیه‌سازی اهداف کنترلـی یـک کنتـرل‌کننـده کلاسـیک PI تنظیم‌شده است [۲۵-۲۲].

برای رسیدن بـه پاسـخ بهینـه عملکـردی کنتـرل‌کننـده PI فـازی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا همان PSO برای بهینه اسـتفاده شده است تا کنترل‌کننده پیشنهادی بتواند تـاثیر بهبـودی خـودش را نشـان دهـد. روش PSO در [۲۷-۲۶] بیـان گردیـده اسـت. نحـوه بهینـه‌سـازی ضـرایب نرمـالیزه‌گرهـا و نرمـالیزه‌زدای کنتـرل‌کننـده پیشنهادی نیز به‌طور کامل در بخش بعد آورده شده است.

۳-۲- کنترل‌کننده فازی پیشنهادی

بـرای بهبـود پاسـخ کنتـرل‌کننـده PI فـازی سـه اقـدام در راسـتای هوشمندسازی کنترل‌کننده PI فازی اولیه انجام شده است که در زیـر آورده شده است.

اقدام اول: یک سیستم خودتنظیم فازی در کنار کنترل‌کنندهPI فـازی قبلی طراحی شده است کـه متناسـب بـا وضـعیت خطـای فرکـانس و تغییرات خطای فرکانس، خروجـی کنتـرل‌کننـده PI فـازی را در هـر لحظه به‌صورت آنلاین بهبود می‌بخشد.

جدول(۱): قوانین فازی شبیه‌ساز اهداف کنترلی یک کنترل‌کننده PI کلاسیک

ΔF/تغییرات ΔF	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 کنترل‌کننده ارائه شده ، ضرایب نرمالیزه‌گر و نرمالیزه‌زدای K_1 و K_2 و K_3 به‌صورت سعی و خطا تعیین نشده، بلکه با استفاده از الگوریتم هوشمند سـازی ازدحـام ذرات یـا همـان PSO، برای کمینه کردن تغییرات فرکانس بهینه‌شده‌اند.

اقدام سوم: برای عملکرد بهتر و مناسب کنترل‌کننده در شرایط مختلف تغییرات بار، یک سیسـتم فـازی خـودتنظیم دیگـر نیـز بـرای تنظـیم خودکار ضرایب بهینه شده نرمالیزه‌گرهـای ورودی K_1 و K_2 طراحـی شده است که متناسب بـا میـزان تغییـرات بـار اعمـالی بـه ریزشـبکه، ضرایب نرمـالیزه‌گرهـای ورودی K_1 و K_2 بـه‌صـورت خودکـار بهبـود می‌یابند. بلوک دیاگرام شکل (۸) به خوبی عملکـرد کنتـرل‌کننـده PI فازی هوشمند خودتنظیم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

با استفاده از توابع عضویت نرمـالیزه شـده در شـکل(۷) بـرای خطـای فرکانس و تغییرات خطای فرکانس به‌عنوان بخـش فـازی سـاز ورودی واحد خودتنظیم، قـوانین اگـر- آنگـاه فـازی بـه‌گونـه‌ای کـه عملکـرد کنترل‌کننده را در هر لحظه بهبود بخشند، در جدول (۲) نوشـته‌شـده

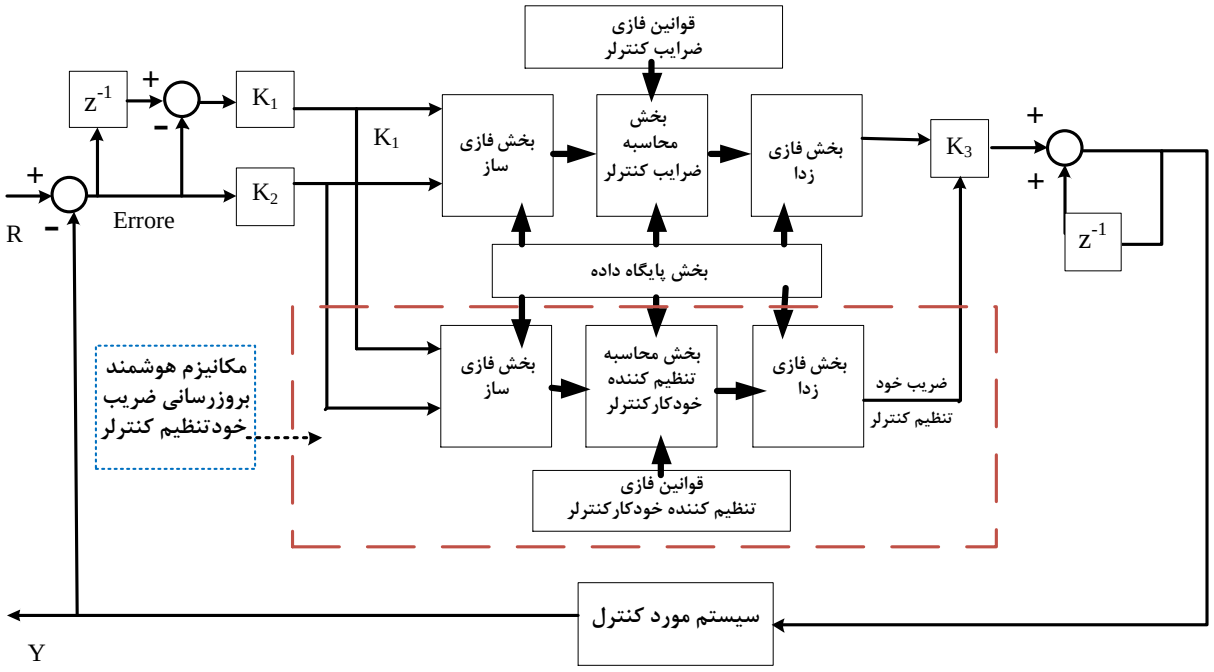
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3- Fall 2018

است. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، بـه کمـک ۴۹ قـانون نوشـته‌شـده فـازی در ایـن جـدول و توابـع عضـویت خروجـی واحـد خودتنظیم کـه در شـکل (۹) قابـل‌مشـاهده اسـت، واحـد خـودتنظیم خروجی کنترل‌کننده فازی تکمیل می‌شود.

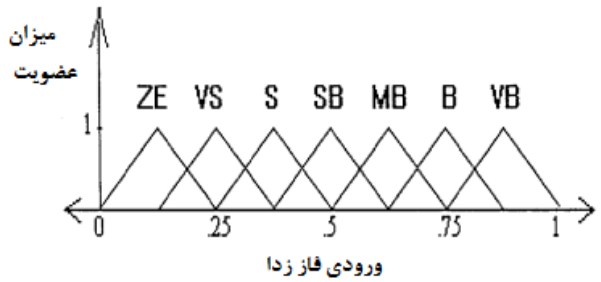
در شکل (۹) توابع عضویت نرمالیزه مورداستفاده برای خروجی واحـد خودتنظیم فازی آورده شده است.که در آن ZE به معنی معـادل صـفر ،VS به معنی خیلی کوچک، S به معنی کوچک، SB بـه معنـی کمـی بزرگ، MB به معنی تا حدودی بزرگ، B به معنـی بـزرگ و VB بـه معنی خیلـی بـزرگ هسـت کـه تعـابیر فـازی نرمـالیزه شـده ضـریب خودتنظیم را نشان می‌دهند.

جدول (۲): جدول قوانین اگر – آنگاه فازی برای ضریب خودتنظیمی خروجی کنترلی کنترل‌کننده 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*



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



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

قوانین اگر-آنگاه نوشته‌شده در جدول (۲) بـه‌گونـه‌ای طراحـی شـده است که خروجی کنترل‌کننده در جایی که نیاز اسـت بـزرگ‌تـر شـود، تقویت کند و در جایی که نیاز است کوچک‌تر شـود، تضـعیف کنـد. از طرفی میزان تقویت و تضعیف مورد نظر روی فضای نرمـال بـین[۱-۰] تعریف‌شده است. برای مثال به توضیح قـوانین نوشـته‌شـده در سـتون وسط می‌پردازیم زمانی که خطای فرکانس نزدیک صفر است زمانی که تغییرات خطای فرکانس نیز کم است چه این تغییرات کم مثبت باشـد و چه منفی ، خروجی کنترل‌کننده باید خیلی تقویت شود و زمانی کـه تغییرات خطای فرکانس نیز متوسط و زیاداست چه این تغییرات مثبت باشد و چه منفـی، بـازهم بـه دلیـل نبـود خطـای فرکـانس، خروجـی کنترل‌کننده نیز باید تقویت شود.

باید در نظر گرفت که برای اینکه خروجی کنترل‌کننـده تقویـت شـود باید ضریب کنترل‌کننده بزرگ‌تر شود ولـی از طرفـی میـزان تقویـت و تضعیف مورد نظر روی فضای نرمـال بـین [۱-۰] تعریـف شـده اسـت بنابراین ضریب نرمالیزه زدای خروجی انتخابی در اینجا باید بزرگ‌تر از حالت نبود آن باشد تا تقویت معنی داشته باشـد کـه همـانطور کـه در ادامه آورده شده است، این اتفاق افتاده است.

همان‌طور که گفته شد، تعیین ضرایب نرمالیزه‌گر و نرمالیزه‌زدای فازی در عملکرد کلی کنترل‌کننده تاثیر زیادی دارد. از طرفی چـون در ایـن

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

کنترل‌کننده PI هوشمند پیشنهادی، بخش جدید خودتنظیم فازی نیز اضافه شده است ، نیاز است تا ضرایب نرمالیزه گرها و نرمالیزه زدای کنترل‌کننده پیشنهادی دوباره تغییر کنند که برای رسیدن به پاسخ بهینه ، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا همان PSO استفاده شده است تا کنترل‌کننده پیشنهادی بتواند تاثیر بهبودی خودش را نشان دهد. نحوه بهینه‌سازی ضرایب نرمالیزه‌گرها و نرمالیزه‌زدای کنترل‌کننده پیشنهادی نیز به‌طور کامل در ادامه آورده شده است. همچنین در ادامه برای تنظیم خودکار ضرایب ورودی کنترل‌کننده PI فازی هوشمند پیشنهادی، یک سیستم فازی طراحی شده است تا ضرایب نرمالیزه گر ورودی کنترل‌کننده پیشنهادی نیز مانند ضریب خروجی آن، خودتنظیم و هوشمند باشد. برای این کار متناسب با میزان تغییرات بار مصرف‌کنندگان در ریزشبکه ، ضرایب نرمالیزه گر ورودی کنترل‌کننده پیشنهادی یعنی همان K2 و K1 به‌صورت 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 پرنده در فضای جستجو است که ذره نام دارد. هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی مساله به دست می آید. پرنده 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 متاثر 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.

$$V_i^{(t+1)} = \omega.V_i^{(t)} + c_1.rand_1(.).(Pbest_i - X_i^{(t)}) + c_2.rand_2(.).(Gbest - X_i^{(t)}) \quad (۱)$$
$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + V_i^{(t+1)}$$

در رابطهٔ 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} بردارمکانی بهترین نقطهٔ پیدا شده توسط ذره i ام است و G_{best} بردارمکانی بهترین نقطهٔ 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 ضرائب برابر ۲ در نظر گرفته شده اند. به این ترتیب الگوریتم PSO قادر است در تکرارهای متوالی نقطهٔ بهینه سراسری تابع مورد نظر را پیدا کند.

۵- شبیه‌سازی‌ها

بلوک دیاگرام مدل ریزشبکه مورد آزمایش در شکل(۵) نشان داده‌شده است که در آن تجمیع اثر تغییرات توان‌های تولیدی هرکدام از واحد های پراکنده و ذخیره‌ساز و میزان تغییرات بار مصرفی مصرف‌کنندگان در ریزشبکه را بر روی تغییرات فرکانس در ریزشبکه نشان می‌دهد و همچنین توان‌های نشان داده‌شده در شکل بیان‌گر تغییرات توان واحد-ها نسبت به نقطه کاری خود می‌باشند. هرچند که در بیشتر مطالعات فرکانسی، از مدل‌های خطی جهت تحلیل رفتار سیستم استفاده می-شود، اما برای بهبود مدل در نظر گرفته شده و نزدیک‌تر شدن به پاسخ واقعی ریزشبکه، یک سری المان‌های غیرخطی مانند محدودکننده‌ها و تأخیرهای زمانی و باندهای مرده به مدل پاسخ فرکانسی اولیه اضافه شده که یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های فیزیکی مربوط به ژنراتور دیزلی بوده، که در اثر محدودیت‌های مکانیکی و گرمایی، همیشه بین اتفاق افتادن اغتشاش و پاسخ به آن تأخیری وجود دارد. همچنین به دلیل وجود فیلترهای متفاوت و کانال‌های مخابراتی، در انتقال پارامترهای اندازه گیری‌شده به سیستم‌های کنترلی نیز تأخیری وجود دارد. پس به خاطر دلایل ذکرشده بلوک‌های تأخیری به مدل سیستم اضافه شده است. منابع تولید دارای باند مرده‌ای 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 محدودکننده در نظر گرفته شده است. پس مدل در نظر گرفته شده در شکل (۵) برای ریزشبکه مورد آزمایش با اضافه کردن بلوک‌های غیرخطی برای در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکرشده، دقیق‌تر شده است. در شکل (۵) نحوه قرارگیری کنترل کننده نیز نمایش داده‌شده است که مانند کنترل کننده افتی دیزل به تنظیم توان لحظه‌ای آن کمک خواهد کرد. همچنین مقادیر پارامترهای مورد استفاده در ریزشبکه مورد آزمایش در جدول (۳) آورده شده است. توضیحات بیشتر در مورد این پارامترها در [۲۰] بیان شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3- Fall 2018

جدول (۳): مقادیر پارامترهای ریزشبکه مورد شبیه‌سازی

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

در ادامه سناریو های متفاوتی طراحی شده و پاسخ کنترل کننده-ها برای هر سناریو در حالت تغییرات ناگهانی بزرگ افزایشی و کاهشی بار مصرف‌کنندگان در ریزشبکه با یکدیگر مقایسه شده است که تاثیر عوامل غیرخطی نیز بررسی شده است . شبیه‌سازی‌ها 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 کنندههای مورد نظر در حالات مختلف اندیس عملکردی میزان انتگرال انحراف فرکانس ریزشبکه از میزان نامی خود (۵۰HZ) ، به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\int \Delta f \, dt = \int |f - 50| dt \qquad (۲)$$

همچنین در تمام سناریوها، میزان رشد اندیس عملکردی انتگرالی فوق نیز برای کنترل کننده های مورد نظر نشان داده‌شده است و مشاهده می‌شود که میزان رشد اندیس عملکردی انتگرالی فوق، در حالتی که از کنترل کنندهPI فازی بهینه شده و هوشمند خودتنظیم پیشنهادی استفاده شده است، به‌مراتب کمتر از دو کنترل کننده دیگر است.در ادامه ضرایب و اقدامات موردنیاز بدست آمده از طراحی کنترل کننده های مختلف با روش‌های توضیح داده‌شده در قبل برای کنترل‌های 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 محدودیت‌های غیرخطی موجود و شرایط مختلف کاری به‌دست‌آمده، در جدول (۴) آورده شده است.

۵-۲- کنترل کننده PI فازی کلاسیک

کنترل کننده PI فازی کلاسیک مورداستفاده که ساختار و تمام جزئیات آن در بخش‌های قبل بیان شده است، نیاز به تعیین ضرایب نرمالیزه‌گر و نرمالیزه‌زدا برای عملکرد صحیح خود می‌باشد که سعی شده تا آنجا که ممکن است ،این ضرایب به‌صورت دستی و با روش سعی و خطا برای عملکرد مناسب کنترل کننده PI فازی متناسب با شرایط مختلف کاری تعیین شود که ضرایب نرمالیزه‌گر K1 و K2 و ضریب نرمالیزه‌زدای K3 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 زدای کنترلر PI فازی کلاسیک

K1	K2	K3
۰/۰۸۱۷	۳۱/۲۹	۴/۸۰۶

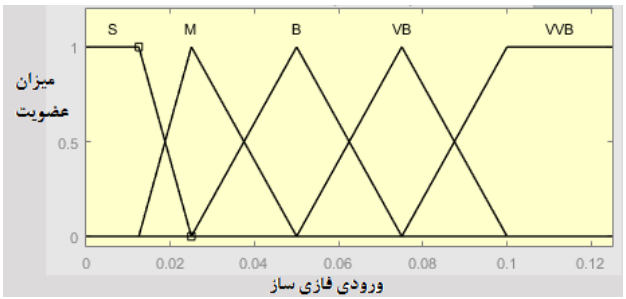
۵-۳- کنترل کنندهPI فازی بهینه و خودتنظیم هوشمند پیشنهادی

کنترل کننده PI فازی هوشمند پیشنهادی که ساختار آن نیز به‌طور کامل در بخش‌های قبل آورده شده است، نیاز به تعیین ضرایب نرمالیزه‌گر و نرمالیزه‌زدا برای عملکرد صحیح خود می‌باشد 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 ۰/۱پریونیت بار و با استفاده از کمینه کردن معیار رابطه (۱)، ضرایب نرمالیزه‌گر و نرمالیزه‌زدای بهینه در جدول (۶) آورده شده است.

جدول (۶): ضرایب نرمالیزه گر و نرمالیزه زدای بهینه شده برای کنترل کنندهPI هوشمند پیشنهادی

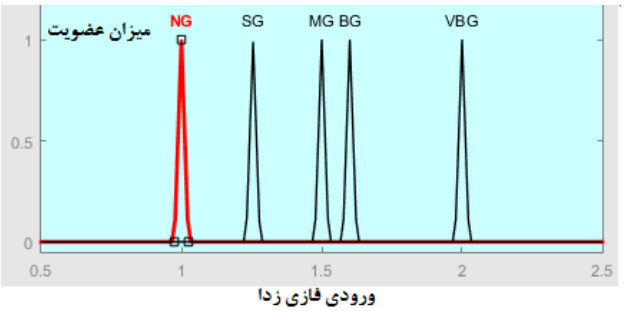
K_1	K_2	K_3
۰/۰۴۴۲	۳۰	۱۶/۸۹

با توجه به اینکه ساختار کنترل کننده پیشنهادی به‌گونه‌ای است که ضریب نرمالیزه‌زدای خروجی کنترل کننده(K3) را به‌صورت خودکار متناسب با تغییرات فرکانس بهبود می‌دهد، 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 به‌صورت زیر در شکل‌های (۱۰تا ۱۲) آورده شده است.

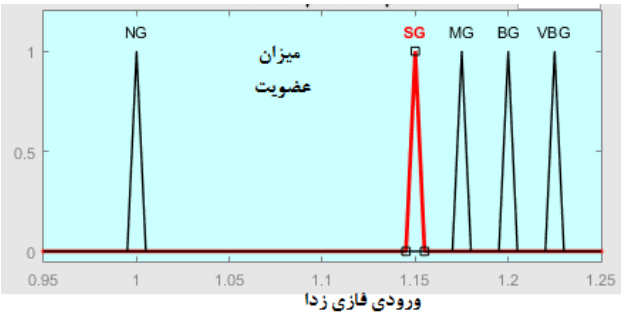


شکل(۱۰): توابع عضویت فازی ساز تغییرات بار برحسب پریونیت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018



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 تعابیری 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 مصرف‌کنندگان در ریزشبکه، بهره های 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 گرها

تغییرات بار/بهره ضرب شونده در	S	M	B	VB	VVB
نرمالیزه گر K1	VBG	BG	MG	SG	**NG**
نرمالیزه گر K2	VBG	BG	MG	SG	**NG**

۵-۴- سناریو های شبیه‌سازی

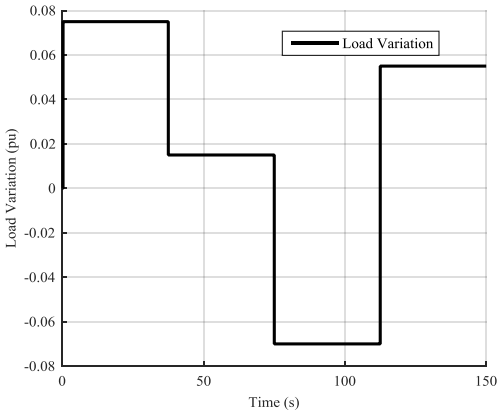
در سناریوی اول، نتایج به دست آمده در حالت عدم حضور باندهای مرده و تاخیر به صورت زیرآورده شده است. همچنین نتایج به دست آمده در این حالت با فرض اینکه توان تولیدی توربین باد و سلول‌های خورشیدی ثابت است، بیان شده است و سپس در سناریو دوم در حالتی که توان تولیدی توربین بادی و سلول خورشیدی هر کدام در بازه معقول متغیر باشند و در صورت حضور باندهای مرده با تاخیر ۵۰ میلی‌ثانیه (برابر۲/۵ 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

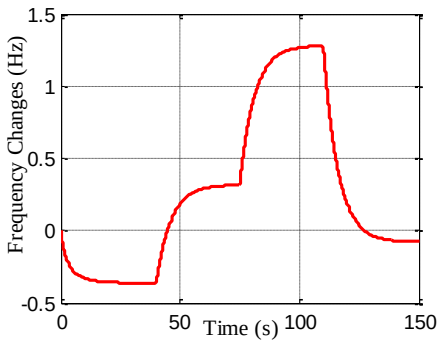
نتایج بدست آمده در صورت حضور تغییرات ناگهانی کاهشی و افزایشی بار مصرف‌کنندگان که توان تولیدی توربین بادی و خورشیدی ثابت باشند و باندهای مرده و بلوک‌های تاخیر حضور ندارند، در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) آمده است. همچنین تمام مقادیر توان‌های تولیدی و مصرفی واحدها برحسب پریونیت هستند.

شکل (۱۳) تغییرات بار را به صورت پله‌ای نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت واحدها تغییرات پله‌ای به‌گونه‌ای ایجادشده که تغییرات فرکانس قابل‌توجهی ایجاد کند.

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



(الف)



(ب)

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]

در نهایت شکل (۱۵) نیز منحنی فرکانس شبکه را در اثر تغییرات بار نشان می‌دهد که در این شکل نیز مشاهده می‌شود 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

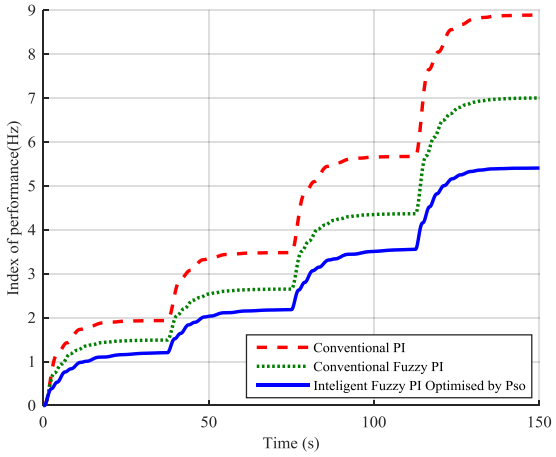
در این سناریو نتایج به دست آمده در حضور تغییرات ناگهانی کاهشی و افزایشی بار مصرف‌کنندگان و تغییرات توان تولیدی توربین بادی و سلول خورشیدی در بازه معقول در حضور عوامل غیرخطی مانند باندهای مرده و تاخیر موردبررسی قرار گرفته است. در این حالت کنترل کننده ها نیز باید بتواند در حضور تغییرات شرایط جوی مانند 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، قابل‌مقایسه با تغییرات بزرگ بار باشند.

شکل (۱۶) تغییرات بار را به صورت پله‌ای نشان می‌دهد که همانند سناریوی قبل با توجه به ظرفیت واحدها تغییرات پله‌ای به‌گونه‌ای ایجادشده که تغییرات فرکانس قابل‌توجهی ایجاد کند.

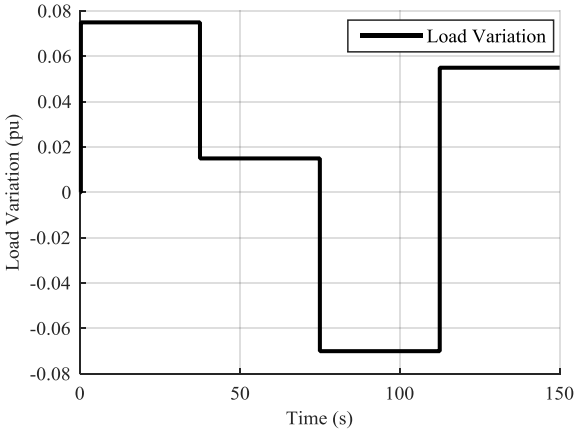
همچنین تغییرات تصادفی تولیدات تجدیدپذیر بادی و خورشیدی نیز در شکل (۱۷) آمده است. با توجه به اینکه این شکل تغییرات توان تولیدی را نشان می دهد، می تواند عددی منفی باشد.

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

در نهایت شکل (۱۹) نیز منحنی تغییرات فرکانس شبکه را در اثر تغییرات بار نشان می‌دهد که در این شکل نیز مشاهده می‌شود 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.



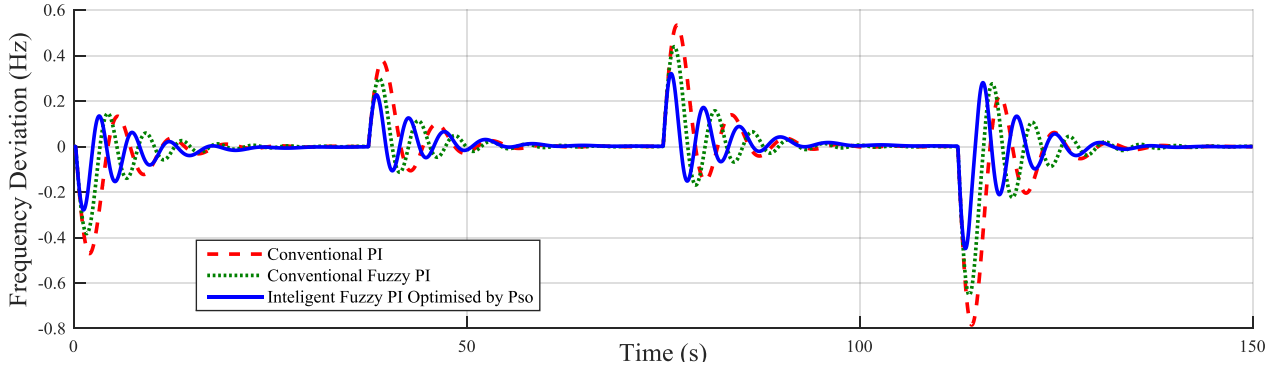
شکل (۱۴): تغییرات اندیس عملکردی در سناریو اول.



شکل (۱۶): تغییرات ناگهانی افزایشی و کاهشی بار در ریزشبکه

۶- نتیجه‌گیری

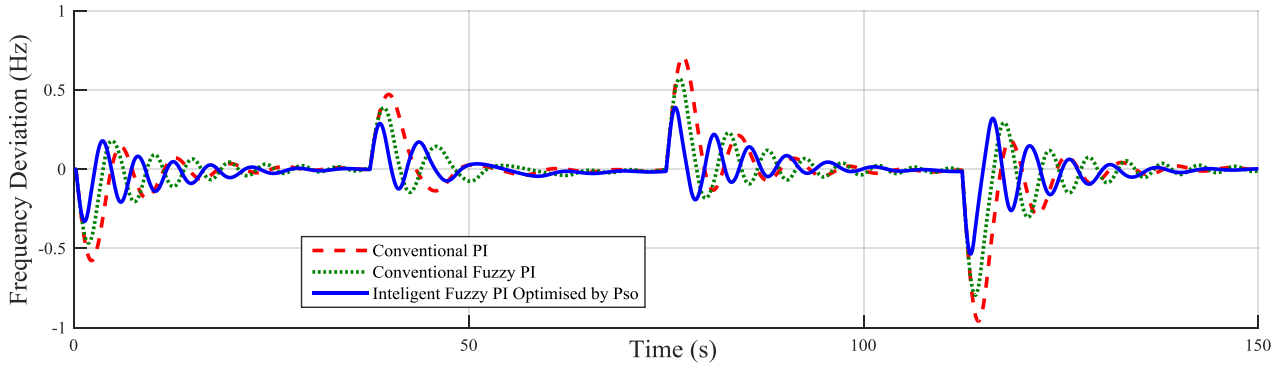
در این مقاله یک کنترل کننده پیشنهادی بر روی واحد ژنراتور دیزل، خروجی تولیدی آن را تغییر داده و به کنترل فرکانس در ریزشبکه که اغلب دارای مشکلاتی مانند اینرسی کم منابع بود، می‌پردازد.



شکل (۱۵): تغییرات فرکانس حول مقدار نامی خود در سناریو اول در تغییرات ناگهانی افزایشی و کاهشی بار مصرف‌کنندگان

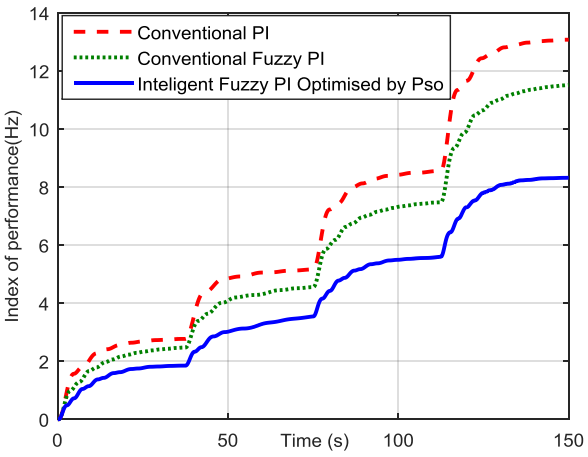
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

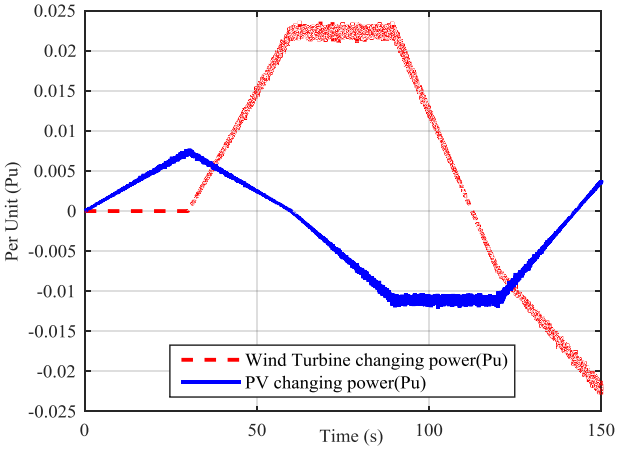


شکل (۱۹): تغییرات فرکانس حول مقدار نامی خود در سناریو دوم در تغییرات ناگهانی بار

همچنین در این مقاله یک کنترل‌کننده PI فازی هوشمند طراحی شده است که عملکردی کاملاً فازی دارد و کنترل کننده PI فازی هوشمند طراحی شده دارای ساختار هوشمندی است که قابل‌اعمال بر سایر سیستم‌ها نیز می باشد. در این مقاله هدف کنترل فرکانس ریزشبکه بوده است. با توجه به اینکه ریزشبکه مورد نظر شامل عوامل غیرخطی است که رفتار سیستم را هرچه بیشتر به رفتار واقعی آن نزدیک‌تر می‌کند، ریزشبکه 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 شبیه‌سازی‌ها شامل تغییرات فرکانس و تغییرات اندیس انتگرالی انحراف فرکانس، عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد.



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



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

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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]

[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,july22-24,2011.

[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, Esmaeil 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 ControlSpringer." 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.

[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] جورابیان، 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 مهندسین برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲ شماره اول بهار و تابستان ۱۳۹۴.

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.7.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018