

## مقابله با اغتشاشات حاصل از وقوع جزیره در نیروگاه گازی، با استفاده از سیستم فازی

### وریزش بار بر پایه شبکه عصبی

مهدی مولودی<sup>۱</sup>، امیر هوشنگ مزینان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد برق کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

### چکیده

در ساختارهایی مانند نیروگاه متمرکز پارس جنوبی که نیروگاه دارای مصرف کنندگانی انحصاری می باشد، کنترل مطلوب توربین در لحظه وقوع حالت جزیره به منظور عدم وقوع اختلال در تامین توان مورد نیاز مصرف کنندگان انحصاری، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زیرا جدایی از شبکه می تواند موجب افزایش یا کاهش بیش از حد سرعت توربین ژنراتور و به تبع آن خارج شدن فرکانس تولیدی از رنج مجاز شود که در نتیجه ای آن عمل تولید توان متوقف خواهد شد. در این مقاله از مدل روئن<sup>۱</sup> برای توربین گازی استفاده شده و پس از اعمال رابطه ی گشتاور ژنراتور به مدل مذکور، دو سیستم کنترلی جهت مقابله با اغتشاش حاصل از وقوع حالت جزیره طراحی شده که عبارتند از کنترل کننده PID فازی و کنترل کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار بر پایه شبکه عصبی. بنابراین در این مقاله از ترکیب کنترل کننده ی PID فازی و سیستم ریزش بار جهت مقابله با اثر اغتشاش حاصل از جدایی بر روی فرکانس استفاده شده است. در انتها عملکرد این کنترل کننده ها در برابر اغتشاش های حاصل از وقوع حالت جزیره به ازای شرایط مختلف با یکدیگر و همچنین کنترل کننده PID زیگلر-نیکولز و کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم تبرید شبیه سازی<sup>۳</sup>، مقایسه شده که نشان دهنده عملکرد مطلوب کنترل کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار بر پایه شبکه عصبی می باشد.

### کلیدواژه

توربین گازی، حالت جزیره، ریزش بار، کنترل فازی، شبکه عصبی.

### مقدمه

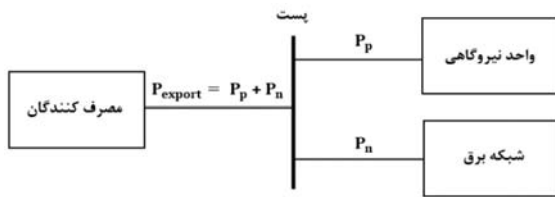
با مقداری کاهش دهد تا واحد نیروگاهی همچنان به برق رسانی خود ادامه داده و قسمت اعظم بارهای پراهمیت در مدار بمانند، بسیار سودمند می باشد. در نیروگاه، توربین به ژنراتور متصل بوده و با تولید گشتاور مکانیکی سبب چرخیدن ژنراتور و تولید توان الکتریکی می شود، فرکانس برق تولیدی با سرعت چرخش ژنراتور رابطه ی مستقیم دارد. همچنین متناسب با مقدار توانی که توسط مصرف کنندگان از ژنراتور گرفته می شود، بر ژنراتور گشتاور الکتریکی برخلاف جهت گشتاور مکانیکی تولیدی توسط توربین، اعمال می شود. بنابراین سرعت و تغییرات سرعت (شتاب) در مجموعه ی توربین ژنراتور متأثر از تفاضل گشتاور مکانیکی و گشتاور الکتریکی خواهد بود. از آنجایی که گشتاور مکانیکی توربین با مقدار

یکی از مهمترین چالش ها در صنعت برق، برق رسانی بدون وقفه به مصرف کنندگان بوده که در صورت پراهمیت بودن مصرف کنندگان، توجه به چالش مذکور حیاتی می باشد. تمامی واحدهای نیروگاهی با هدف افزایش پایداری واحد، به شبکه برق متصل می باشند و از آنجایی که به دلایل گوناگون مانند خطای انسانی، خطای سیستمی و دیگر مشکلات در خط ارتباطی با شبکه برق، احتمال قطع ناخواسته این ارتباط وجود دارد، بررسی اثر اغتشاش حاصل از جدایی ناخواسته اهمیت ویژه ای داشته و به همین دلیل، پیشنهاد راهکاری که بتواند به نحوی اثر اغتشاش مورد نظر را از بین برده و

<sup>۱</sup> Rowen  
Proportional-Integral-Derivative<sup>†</sup>  
Simulated annealing(SA)<sup>‡</sup>

### ارائه روش پیشنهادی

در شکل ۱،  $P_p$  توان تولیدی واحد نیروگاهی بوده و  $P_n$  توانی است که از شبکه سراسری دریافت می‌شود. در نهایت  $P_{export}$  که مجموع توان تولیدی و توان دریافتی از شبکه می‌باشد به مصرف کنندگان منتقل می‌شود. در لحظه وقوع حالت جزیره‌ای، ارتباط با شبکه سراسری قطع شده و در نتیجه  $P_n$  صفر خواهد شد بنابراین واحد نیروگاهی به تنهایی می‌بایست  $P_{export}$  را تولید کرده و یا به عبارتی  $P_n$  را جبران کند. هر چه  $P_n$  بزرگتر بوده باشد، اغتشاش حاصل از وقوع حالت جزیره شدیدتر و چالش کنترلی نیز جدی‌تر خواهد بود.



شکل ۱. ارتباط واحد نیروگاهی با شبکه و مصرف کنندگان

کنترل‌کننده پیشنهادی از نوع PID بوده که پارامترهای آن متناسب با شرایط، توسط سیستم فازی تعیین خواهد شد. به این ترتیب در لحظه وقوع حالت جزیره‌ای، سیستم فازی پارامترهای PID را به صورت مطلوب تعیین می‌نماید. برای رسیدن به یک سیستم فازی بهینه که متناسب با شرایط بهترین پارامترها را تعیین نماید، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده شده است [۹]، [۱۱]، [۱۶]. پس از بهینه‌سازی سیستم فازی، قطعاً باز هم به ازای حالت‌های بحرانی (حالت‌هایی که در آن‌ها قبل از جداسدن از شبکه توان قابل توجهی از آن دریافت می‌شود)، پاسخ گذرا مطلوب نخواهد بود که نشان از خارج شدن فرکانس از محدوده مجاز در حالت گذرا دارد [۲]. برای حل این مشکل، از ریزش بار به عنوان یک راهکار کنترلی استفاده شده است [۱۸]، [۱۹]. در این مقاله، تصمیم‌گیری در مورد ریزش بار و مقدار آن، توسط یک شبکه عصبی چندلایه انجام می‌شود بنابراین هدف، طراحی و بهینه‌سازی یک کنترل‌کننده PID فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور دستیابی به پاسخ مطلوب برای فرکانس برق تولیدی در حالت گذرای وضعیت جزیره‌ای در یک نیروگاه گازی است. همچنین به منظور دستیابی به جواب مطلوب به ازای تمامی شرایط، سیستم مدیریت ریزش بار برپایه شبکه عصبی طراحی شده است.

سوخت تزریقی مرتبط است، جهت کنترل گشتاور مکانیکی از مقدار سوخت تزریقی به عنوان عامل کنترلی استفاده می‌شود [۸]، [۲۰]. در نیروگاه، توربین به ژنراتور متصل بوده و با تولید گشتاور مکانیکی سبب چرخیدن ژنراتور و تولید توان الکتریکی می‌شود، فرکانس برق تولیدی با سرعت چرخش ژنراتور رابطه مستقیم دارد. همچنین متناسب با مقدار توانی که توسط مصرف کنندگان از ژنراتور گرفته می‌شود، بر ژنراتور گشتاور الکتریکی برخلاف جهت گشتاور مکانیکی تولیدی توسط توربین، اعمال می‌شود. بنابراین سرعت و تغییرات سرعت (شتاب) در مجموعه توربین ژنراتور متأثر از تفاضل گشتاور مکانیکی و گشتاور الکتریکی خواهد بود. از آنجایی که گشتاور مکانیکی توربین با مقدار سوخت تزریقی مرتبط است، جهت کنترل گشتاور مکانیکی از مقدار سوخت تزریقی به عنوان عامل کنترلی استفاده می‌شود [۸]، [۲۰].

در حالت معمول تمامی واحدهای نیروگاهی به شبکه برق متصل می‌باشند مد جزیره‌ای زمانی رخ می‌دهد که یک نیروگاه به دلایلی از شبکه سراسری جدا شود در این حالت بزرگترین چالش، کنترل فرکانس برق تولیدی است زیرا اگر قبل از منفک شدن از شبکه، بخشی از توان مورد نیاز مصرف کنندگان انحصاری از طریق شبکه تامین شود، پس از جداسدن از شبکه بار الکتریکی بر روی ژنراتور ناگهان افزایش یافته و سبب کاهش سرعت چرخش توربین ژنراتور و به تبع آن کاهش فرکانس می‌شود (زیرا در ژنراتورهای سنکرون رابطه  $N = \frac{120f}{p}$  که در آن  $N$  سرعت چرخش ژنراتور،  $f$  فرکانس ولتاژ تولیدی و  $p$  تعداد قطب‌های ژنراتور بوده، برقرار است). و در صورتی که قبل از وقوع مد جزیره‌ای سیستم در حال تحویل توان به شبکه باشد، پس از جداسدن از آن، سرعت چرخش توربین ژنراتور افزایش یافته و سبب افزایش فرکانس می‌شود [۱]. از آنجایی که فرکانس باید در یک محدوده مشخص باشد، افزایش یا کاهش بیش از حد فرکانس می‌تواند باعث خارج شدن فرکانس از محدوده مجاز شده و در نهایت منجر به خارج شدن واحد نیروگاهی از مدار شود که در این صورت، مصرف کنندگان انحصاری آن واحد نیروگاهی (مصرف کنندگانی که به شبکه سراسری متصل نبوده و به صورت مستقیم به آن واحد نیروگاهی متصل می‌باشند)، بی‌برق خواهند شد [۲].

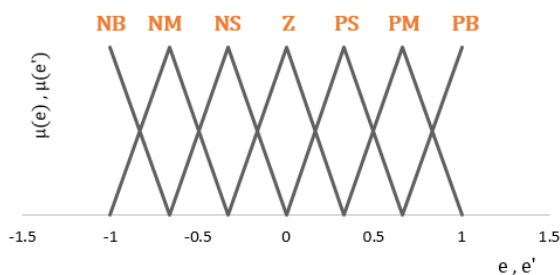
در این مقاله ساختار نیروگاه متمرکز پارس جنوبی که با هدف تامین توان الکتریکی مجموعه‌های پالایشگاهی بنا شده و به منظور پایداری به شبکه برق متصل می‌باشد در نظر گرفته شده و وقوع حالت جزیره‌ای در وضعیتی که به کاهش فرکانس می‌انجامد، بررسی و سیستم کنترلی مطلوب با هدف پایداری فرکانسی به منظور خارج نشدن فرکانس از محدوده مجاز در حالت گذرا، طراحی شده است.

## ساختار کنترلی

اثر بزرگترین اغتشاشات حاصل از جزیره شدن می‌باشد در مرحله دوم طراحی ریزش بار توسط شبکه عصبی به عنوان یک راهکار کمکی به کنترل‌کننده PID فازی اضافه شده است. طبیعتاً هرچه اختلاف بین مقدار توان اکتیو تولیدی واحد نیروگاهی مقدار توان مصرفی توسط مصرف‌کنندگان بیشتر باشد، اغتشاش وارده نیز بزرگتر خواهد بود. برای حالتی که به دلیل بزرگ بودن اغتشاش، سیستم فازی و کنترل‌کننده PID توانایی مقابله با آن را ندارند، به وسیله‌ی کاهش مصرف‌کنندگان (ریزش بار)، اغتشاش را مقداری کاهش داده تا سیستم فازی و کنترل‌کننده بتوانند با آن مقابله کرده و در نهایت فرکانس از رنج مجاز خارج نشود، این عمل توسط سیستم ریزش بار برپایه شبکه عصبی انجام می‌شود. شبکه عصبی مذکور توسط قسمتی از پاسخ‌هایی که کنترل‌کننده PID فازی به ازای مقادیر مختلف  $Pe_1$  و  $Pe_2$ ، به دست داده است آموزش داده خواهد شد. در شکل ۲،  $Pe_{2max}$  بزرگترین مقدار توانی است که متناظر با مقدار  $Pe_1$ ، سیستم در لحظه وقوع جدایی می‌تواند تولید کند به طوری که پاسخ گذرای سرعت در هیچ نقطه‌ای کوچکتر از ۹۹٪ نشود. همچنین مقدار بار ریخته شده در لحظه جدایی بوده که خروجی شبکه عصبی به صورت غیرمستقیم مقدار آن را تعیین خواهد کرد.

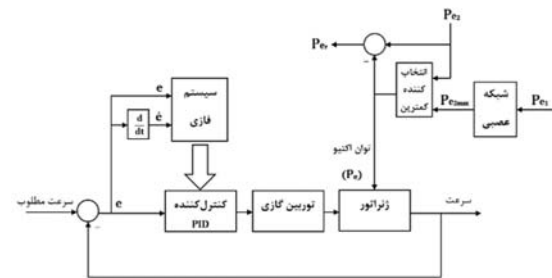
## طراحی سیستم فازی

همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، خطا و مشتق خطای سرعت دو ورودی سیستم فازی در نظر گرفته شده‌اند تا براساس مقادیر آن‌ها، سیستم فازی بهترین مقادیر را برای پارامترهای کنترل‌کننده PID در شرایط مختلف تعیین نماید. توابع تعلق ورودی‌ها از نوع مثلثی و خروجی‌ها از نوع گوسیمطابق با شکل ۳، ۴ و ۵ در نظر گرفته شده است [۱۳]، [۱۴] و [۱۵].



شکل ۳. نمودار توابع تعلق ورودی‌های سیستم فازی

بصورت کلی در این مقاله، دیگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی بصورت شکل ۲ می‌باشد. در این مقاله از مدل ساده شده رونن برای توربین گازی استفاده شده [۱۷] و اثر گشتاور الکتریکی ژنراتور بر آن اعمال شده است.  $Pe_1$  و  $Pe_2$  به ترتیب، مقدار توان تولیدی ژنراتور قبل از جدایی از شبکه و مقدار توان تولیدی ژنراتور بعد از جدایی از شبکه (مقدار توانی که مصرف‌کنندگان انحصاری متصل به نیروگاه مصرف می‌کنند) بوده که اطلاعاتی از وضعیت سیستم، قبل از وقوع جزیره می‌باشند.  $e$  و  $\dot{e}$  خطا و مشتق خطای سرعت بوده که براساس آن‌ها، سیستم فازی بهترین پارامترها را برای کنترل‌کننده PID در هر لحظه تعیین می‌نماید. در مرحله اول طراحی، شبکه عصبی و ریزش بار وجود نداشته و کنترل‌کننده PID فازی به تنهایی سعی در به حداقل رساندن اثر اغتشاش خواهد داشت. بنابراین قبلاً وقوع اغتشاش (جدایی از شبکه)، توان تولیدی ژنراتور برابر با  $Pe_1$  خواهد بود و در لحظه جدایی مقدار آن به  $Pe_2$  افزایش می‌یابد. در این وضعیت پارامترهای PID توسط سیستم فازی مرتباً بروز شده و در نتیجه سیستم فازی به همراه کنترل‌کننده PID، با اغتشاشی که به دلیل وقوع جزیره ایجاد شده است، مقابله خواهند کرد. به این ترتیب تلاشی کنترلی در جهت ثابت نگاه داشتن فرکانس و جلوگیری از کاهش بیش از حد فرکانس، صورت خواهد پذیرفت.



شکل ۲. نمودار بلوکی سیستم کنترل

براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، کمترین مقدار مجاز سرعت (فرکانس) را ۹۹٪ فرض می‌کنیم به عبارت دیگر از لحظه‌ی جدایی از شبکه، کنترل‌کننده PID فازی باید سرعت را به نحوی کنترل کند تا پاسخ سرعت در هیچ نقطه‌ای کوچکتر از ۹۹٪ نبوده و به این ترتیب عمل برق‌رسانی مختل نشود. اما آیا تلاش کنترلی اخیر همیشه و به ازای وقوع تمامی اغتشاشات ممکن، نتیجه‌ای مثبت و کامل را در پی خواهد داشت؟ جواب خیر است زیرا به دلیل لختی توربین و همچنین امکان وجود اختلاف زیاد بین مقادیر  $Pe_1$  و  $Pe_2$ ، حالتی وجود خواهند داشت که به ازای آن‌ها، اغتشاش وارده بسیار شدید بوده و طبیعتاً مجموعه سیستم فازی و کنترل‌کننده PID توانایی مقابله با آن را نداشته و در نتیجه‌ی آن، سرعت (فرکانس) کمتر از حداقل مقدار مجاز خواهد شد. با توجه به اینکه هدف اصلی در این مقاله حفظ کردن واحد نیروگاهی در مدار و یا به عبارتی، مقابله با

از وقوع اغتشاش ارائه کند و همچنین با توجه به اینکه بصورت طبیعی مقادیر خطا در لحظات اول و قبل از ماندگار شدن پاسخ، بسیار بزرگتر از مقادیر خطا پس از وقوع اغتشاش است، از ضریب وزن  $w$  که در لحظات قبل از وقوع اغتشاش برابر با ۱ و از لحظه وقوع اغتشاش به بعد برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است به منظور دستیابی به عملکردی متوازن در همه لحظات، استفاده خواهد شد. بنابراین از مجموع مربعات خطا بصورت رابطه ۱ به عنوان تابع شایستگی استفاده شده است.

$$\text{Fitness function} = \sum_{k=0}^{N-1} [w_{(kT)} \cdot e^2(kT) \cdot T] \quad (1)$$

در رابطه ۱ داریم:

$$w_{(kT)} = \begin{cases} 1 & kT < t_d \\ 10 & kT \geq t_d \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $t_d$  برابر است با زمان وقوع اغتشاش.

### طراحی سیستم ریزش بار با استفاده از شبکه عصبی

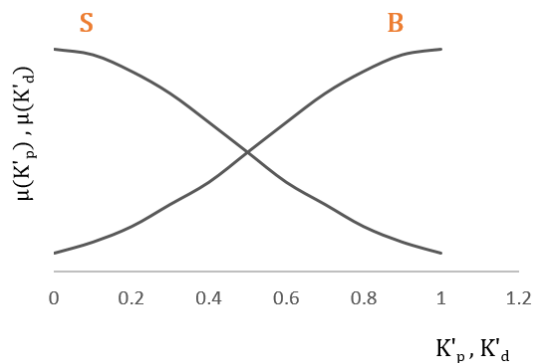
دلیل افت سرعت در لحظه جدایی از شبکه افزایش ناگهانی گشتاور الکتریکی (Te) ژنراتور است. این گشتاور با مقدار توان اکتیو تحویلی ژنراتور که آن نیز به حجم مصرف کنندگان وابسته است، رابطه مستقیم دارد. بنابراین برای مقادیری از  $Pe_1$  و  $Pe_2$  که اغتشاش حاصل از جدایی به ازای آن‌ها آنقدر بزرگ بوده که سیستم کنترل PID فازی طراحی شده، نمی‌تواند سرعت را در رنج مجاز نگاه دارد، توسط ریزش بار (کاهش  $Pe_2$ ) در لحظه وقوع جدایی از شبکه، گشتاور الکتریکی (Te) مقداری کاهش خواهد یافت. در نتیجه کنترل کننده با اغتشاش کوچکتری مواجه بوده و می‌تواند پاسخ سرعت را در رنج مجاز حفظ کند.

بنابراین پس از بهینه سازی سیستم فازی که در بخش قبل شرح داده شد، پاسخ سیستم کنترل به ازای مقادیر مختلف  $Pe_1$  و  $Pe_2$  بررسی شده و برای هر مقدار از  $Pe_1$  بزرگترین مقدار  $Pe_2$  که به ازای آن سیستم کنترل PID فازی می‌تواند پاسخ سرعت را بالاتر از ۹۹٪ نگاه دارد ( $Pe_{2max}$ ) تعیین شده و در ادامه از اطلاعات بدست آمده به عنوان داده‌های آموزشی برای شبکه عصبی استفاده شده است. بنابراین برای این منظور شبکه‌ای عصبی با یک ورودی و یک خروجی نیاز است.

شبکه عصبی انتخابی در این مقاله از نوع پرسپترون چندلایه‌ها یک لایه مخفی بصورت شکل ۶ می‌باشد [۱۰].



شکل ۴. نمودار توابع تعلق برای خروجی سیستم فازی



شکل ۵. نمودار توابع تعلق برای خروجی‌های  $K_p$  و  $K_d$  سیستم فازی

در این مقاله به دلیل سادگی و عملکرد قابل توجه از موتور استنتاج مینیمم و همچنین غیرفازی‌ساز مرکز ثقل استفاده شده است.

### بهینه‌سازی پایگاه قواعد توسط الگوریتم ژنتیک

در این مرحله حلقه کنترلی بدون شبکه عصبی (بدون ریزش بار) در نظر گرفته شده است. بنابراین مقدار توان بار برای ژنراتور پس از جدایی از شبکه، برابر با مقدار توان مصرفی ( $Pe_2$ ) خواهد بود. در این قسمت پایگاه قواعد فازی به ازای وقوع بزرگترین اغتشاش ممکن که در آن  $Pe_1 = 0$  و  $Pe_2 = 1$  توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است.

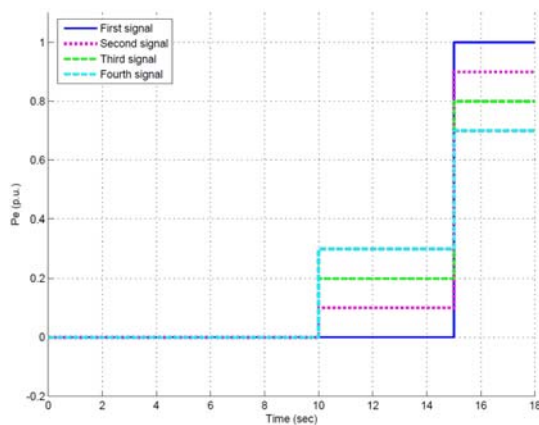
الگوریتم ژنتیک می‌بایست به ازای سرعت مطلوب یک و همچنین تغییر  $Pe$  از مقدار صفر به یک در لحظه‌ای خاص (زمانی پس از ماندگار شدن پاسخ سرعت)، کیفیت پاسخ‌هایی که هریک از اعضای جمعیت در آن نسل بخصوص، در ساختار کنترلی بدست می‌دهند را بسنجد. هدف در این مقاله پاسخ مطلوب سرعت و خصوصاً کوچکتر نشدن مقدار سرعت از عدد ۹۹٪ پس از وقوع اغتشاش می‌باشد بنابراین کوچک بودن خطای سرعت فراگیرترین هدف بوده و به همین دلیل در نهایت از ساختار مجموع مربعات خطا به عنوان تابع شایستگی استفاده شده است.

از آنجایی که در این مقاله کنترل کننده می‌بایست عملکرد قابل قبولی را هم در لحظات قبل از وقوع اغتشاش و هم در لحظات بعد

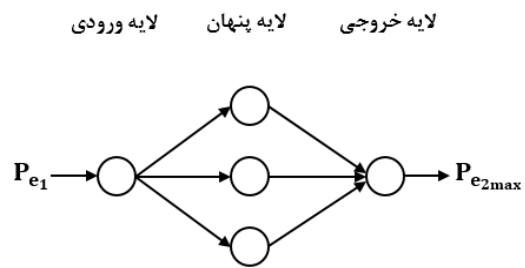
نتایج شبیه‌سازی

از آنجایی که در واقعیت، قبل از ماندگار شدن سرعت مجموعه توربین ژنراتور هیچ باری روی ژنراتور اعمال نمی‌شود بنابراین  $P_e$  را تا لحظاتی پس از ماندگار شدن پاسخ سرعت، صفر در نظر گرفته (تا ثانیه ۱۰) و پس از آن مقدار اولیه را به آن اعمال کرده ( $P_{e1}$ ) و مدتی پس از آن (در ثانیه ۱۵) به منظور شبیه‌سازی حالت جدایی از شبکه، بصورت ناگهانی  $P_e$  به مقدار ثانویه ( $P_{e2}$ ) افزایش خواهد یافت. به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل در برابر اغتشاش حاصل از جدایی در چهار شرایط مختلف، چهار سیگنال مطابق شکل ۸ برای  $P_e$  در نظر گرفته شده است.

در ادامه، پاسخ‌های سرعت سیستم از ثانیه ۱۰ به بعد با کنترل-کننده PID فازی و کنترل‌کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار به ازای اعمال چهار سیگنال  $P_e$ ، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. در نمودارهای مذکور سرعت ۹۹٪ به عنوان شاخص در نظر گرفته شده و در نتیجه پایین‌تر آمدن سرعت از آن به منزله خارج شدن فرکانس از رنج مجاز است.



شکل ۸. سیگنال‌های انتخابی برای  $P_e$  به منظور شبیه‌سازی حالت جدایی از شبکه

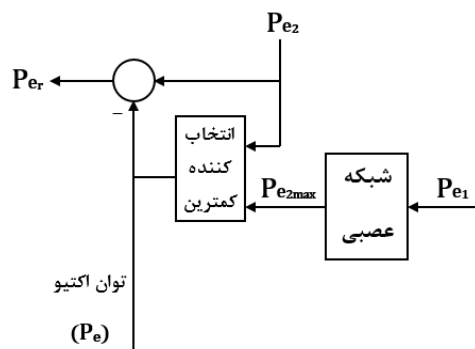


شکل ۶. ساختار شبکه عصبی برای ریزش بار

برای آموزش شبکه عصبی فوق از زوج‌های ( $P_{e1}, P_{e2max}$ ) که براساس پاسخ سرعت سیستم با کنترل‌کننده PID فازی بدست آمده استفاده شده است. در این مقاله از ۱۵ داده جهت آموزش، ۳ داده جهت اعتبارسنجی و ۳ داده جهت آزمایش نهایی شبکه استفاده شده است همچنین الگوریتم آموزش لوبنرگ-مارکاردی باشد.

قبل از وقوع جدایی از شبکه، توان الکتریکی تولیدی ژنراتور ( $P_e$ ) برابر با  $P_{e1}$  بوده و در لحظه جدایی، بخش ریزش بار بصورت شکل ۷، وارد عمل شده و سبب می‌شود در صورت کوچکتر بودن  $P_{e2}$  نسبت به  $P_{e2max}$ ، ریزش باری انجام نشده و بار الکتریکی متصل به ژنراتور برابر با  $P_{e2}$  باشد. در صورتی که  $P_{e2}$  نسبت به  $P_{e2max}$  بزرگتر باشد به این معنی است که در صورت عدم انجام ریزش بار، پاسخ سرعت از عدد ۰/۹۹ کوچکتر خواهد شد بنابراین سیستم ریزش بار، به مقدار  $P_{e2} - P_{e2max}$  ریزش بار انجام خواهد داد و در نتیجه بار الکتریکی متصل به ژنراتور برابر با  $P_{e2max}$  خواهد بود. مقدار  $P_{er}$  مقدار بار ریخته شده می‌باشد که در رابطه ۸ توصیف شده است.

$$P_{er} = P_{e2} - \min(P_{e2max}, P_{e2}) \quad (۳)$$



شکل ۷. بخش ریزش بار در ساختار کنترلی

### مقایسه

در این بخش با هدف اعتبارسنجی روش‌های کنترلی استفاده شده در مقاله حاضر، در قالب جدول ۱، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده صورت گرفته است. همچنین عملکرد سیستم‌های کنترل طراحی شده با عملکرد کنترل کننده PID بهینه شده با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی کننده مقایسه شده است [۱۷]. در جدول ۱، معیار ISE برای لحظات پس از وقوع اغتشاش ( $t \geq 15 \text{ sec}$ ) به ازای سیگنال اول  $P_e$ ، و همچنین بزرگترین اغتشاش ممکن از مقدار اولیه  $0 = P_e$  که کنترل کننده قابلیت مقابله موثر با آن را دارد برای سیستم‌های کنترلی مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

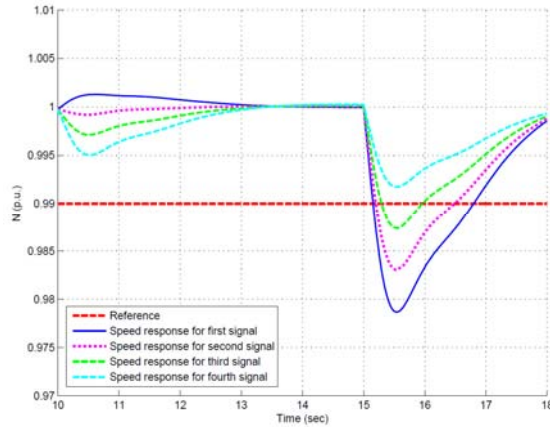
جدول ۱. مقایسه نتایج بدست آمده

معیار	بیشترین افزایش مجاز $P_e$ از مقدار اولیه صفر	معیار ISE به ازای وقوع بزرگترین اغتشاش ممکن
سیستم کنترل PID زیگلر-نیکولز	0.397	$4.79 \times 10^{-4}$
PID فازی	0.460	$4.18 \times 10^{-4}$
PID فازیه همراه سیستم ریزش بار	1	$9.38 \times 10^{-5}$
PID تنظیم شده با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی	0.423	$4.56 \times 10^{-4}$

مشاهده می‌شود سیستم کنترل PID فازی به همراه سیستم ریزش بار بهترین عملکرد را داشته و همچنین سیستم کنترل PID فازی عملکرد بهتری را نسبت به سیستم کنترل PID زیگلر-نیکولز و سیستم کنترل PID تنظیم شده با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی، ارائه داده است.

### نتیجه‌گیری

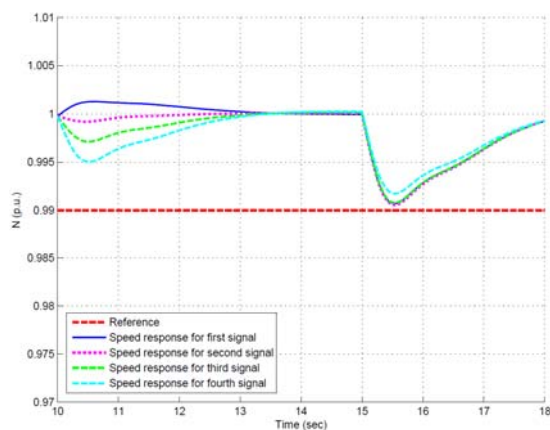
در این مقاله با هدف مقابله با اثر اغتشاش حاصل از جدایی از شبکه (افزایش ناگهانی بار الکتریکی)، پس از تعیین مدل توربین گازی و اعمال اثر گشتاور الکتریکی ژنراتور به آن، ابتدا یک کنترل کننده PID فازی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، طراحی و عملکرد آن به ازای وقوع چهار اغتشاش شاخص، بررسی شد. کنترل کننده PID فازی در مقابله موثر با اغتشاشات بزرگ، ناتوان بود. در مرحله بعد به منظور دستیابی به سیستم کنترلی که بتواند به ازای وقوع هر مقدار از اغتشاش پاسخ سرعت را در محدوده مجاز حفظ کرده و سبب در رنج ماندن فرکانس شود، سیستم ریزش بار بر پایه شبکه عصبی در کنار کنترل کننده PID فازی طراحی شد. پس از بررسی عملکرد سیستم کنترل کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار، مشاهده شد عملکرد سیستم مذکور قابل قبول بوده و توانایی مقابله با هر مقدار از اغتشاش را دارد. در انتها با مقایسه نتایج بدست آمده،



شکل ۹. پاسخ‌های سرعت سیستم با کنترل کننده PID فازی به ازای اعمال چهار  $P_e$

با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود فرکانس به ازای اغتشاش حاصل از سیگنال‌های اول تا سوم  $P_e$  از رنج مجاز خارج شده و کنترل کننده فقط توانایی مقابله موثر با اغتشاش حاصل از سیگنال چهارم را دارد. با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود فرکانس به ازای اغتشاش حاصل از تمامی سیگنال‌های  $P_e$  در رنج مجاز مانده و کنترل کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار توانایی مقابله موثر با اغتشاش حاصل از تمامی سیگنال‌های  $P_e$  را دارد.

همچنین با مقایسه پاسخ‌های متناظر ارائه شده در شکل ۹، مشاهده می‌شود سیستم ریزش بار سبب شده است، کمترین مقدار پاسخ سرعت پس از وقوع هر اغتشاش، بهبود یافته که عملکرد بهتر کنترل کننده PID فازی به همراه سیستم ریزش بار را در برابر اغتشاش نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. پاسخ‌های سرعت سیستم با کنترل کننده PID فازیه همراه سیستم ریزش بار به ازای اعمال چهار سیگنال  $P_e$

- [11] R. Malhotra, N. Singh and Y. Singh, "An efficient fuzzy-ga flow control of turbine compressor system: a process control case study", international journal of advancements in computing technology, vol. 2, pp. 128-139, 2010.
- [12] Zhitao Wang and Shuying Li, "Simulation study on fuzzy pid control of gas turbine generating sets speed", iee, intelligent computing and intelligent systems international conference, 2009.
- [13] M.Montazeri-Gh, H.Yousefpour and S.Jafari, "Fuzzy logic computing for design of gas turbine engine fuel control system", iee, computer and automation engineering international conference, 2010.
- [14] Arnulfo Rodriguez-Martinez, Raul Garduno-Ramirez and Luis Gerardo Vela-Valdes, "PI fuzzy gain-scheduling speed control at startup of a gas-turbine power plant", iee, transactions on energy conversion, vol. 26, pp. 310-317, 2011.
- [15] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka and Satoru Isaka, "Fuzzy gain scheduling of pid controllers", iee, transactions on systems, vol. 23, pp. 1392-1398, 1993.
- [16] Morteza Montazeri-Gh and Amir Safari, "Tuning of fuzzy fuel controller for aero-engine thrust regulation and safety considerations using genetic algorithm", elsevier, aerospace science and technology, vol. 15, pp. 183-192, 2011.
- [17] S. Balamurugan, N. Janarthanan and K.R.M. Vijaya Chandrakala, "Small and large signal modeling of heavy duty gas turbine plant for load frequency control", elsevier, electrical power and energy systems, vol. 79, pp. 84-88, 2016.
- [18] C. T. Hsu, M. S. Kang and C. S. Chen, "Design of adaptive load shedding by artificial neural networks", iee, proceedings generation, transmission and distribution, volume 152, pp. 415-421, 2005.
- [19] R. Hooshmand and M. Moazzami, "Optimal design of adaptive under frequency load shedding using artificial neural networks in isolated power system", elsevier, international journal of electrical power and energy systems, vol. 42, pp. 220-228, 2012.
- [20] P.C.Sen, "Principles of electric machines and power electronics", wiley and sons, 1997.
- مشخص شد سیستم کنترل PID فازی به همراه سیستم ریزش بار بهترین عملکرد را داشته و همچنین سیستم کنترل PID فازی، عملکردی بهتر از سیستم کنترل PID زیگلر-نیکولز و سیستم کنترل PID تنظیم شده با الگوریتم تبرید شبیه سازی را ارائه می کند.

## مراجع

- [1] S. Baudoin, I. Vechiu and H. Camblong, "A review of voltage and frequency control strategies for islanded microgrid", iee, 16th international conference on system theory, 2012.
- [2] J. Horne, D. Flynn and T. Littler, "Frequency stability issues for islanded power systems", iee, power systems conference and exposition, 2004.
- [3] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines", asme, journal of engineering for power, vol. 105, pp. 865-869, 1983.
- [4] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service", asme, gas turbine and aeroengine international congress and exposition, 1992.
- [5] S. K. Yee, J. V. Milanović and F. M. Hughes, "Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies", iee, transactions on power systems, vol. 23, pp. 108-118, 2008.
- [6] F. P. De Mello and D. J. Ahner, "Dynamic models for combined cycle plants in power system studies", iee, transactions on power systems, vol. 9, pp. 1698-1708, 1994.
- [7] Silvio Simani, "Identification and fault diagnosis of a simulated model of an industrial gas turbine", iee, transactions on industrial informatics, vol. 1, pp. 202-216, 2005.
- [8] Saeed Bahrami, Ali Ghaffari, S.HosseinSadati and Marcus Thern, "Identifying a simplified model for heavy duty gas turbine", springer, journal of mechanical science and technology, vol. 28, pp. 2399-2408, 2014.
- [9] Rahul Malhotra, Narinder Singh and Yaduvir Singh, "Soft computing techniques for process control applications", international journal on soft computing, pp. 32-44, 2011.
- [10] C.M. Bartolini, F. Caresana, G. Comodi, L. Pelagalli, M. Renzi and S. Vagni, "Application of artificial neural networks to micro gas turbines", elsevier, energy conversion and management, vol. 52, pp. 781-788, 2011.

