

کنترل فرکانس ریزشبه در حالت جزیره ای با استفاده از ذخیره سازها به کمک الگوریتم بهینه سازی وال

حسین نعمتی^۱، بهروز الفی^۲، هادی مهدوی^{۳*}، حسین شایقی^۴

چکیده

کنترل موثر در عملکرد جزیره ای ریزشبه مستلزم کنترل سیستم ذخیره انرژی با سایر منابع کنترل پذیر ریزشبه است. در طی عملکرد جزیره ای، تعادل توان بین تولید و تقاضا به صورت آنی برقرار نیست. در نتیجه فرکانس ریزشبه نوسان خواهد کرد و تا زمانی که مکانیزم مناسبی برای متعادل کردن توان وجود نداشته باشد ممکن است سیستم را به خاموشی بکشاند. سیستم ذخیره انرژی در زمان میلی ثانیه پاسخ می دهد. واضح است که سیستم ذخیره انرژی باید نقش مهمی را در حفظ پایداری فرکانسی طی عملکرد جزیره ای ایفا نماید. ریزشبه ها به عنوان یک الگو برای سیستم قدرت آینده مورد توجه قرار گرفته اند. آنها می توانند چندین منبع انرژی تجدیدپذیر را در کنار یکدیگر قرار دهند و برق با قابلیت اطمینان بالا تامین نمایند. تجهیزات الکترونیک قدرت در منابع تولید پراکنده ریزشبه ها می توانند قابلیت آنها را در تقابل با اختلالات و عدم قطعیت ها افزایش دهند. اخیراً، نشان داده شده است که ریزشبه ها با بکارگیری سیستم های ذخیره انرژی باتری می توانند عملکرد خود را بهبود بخشند. سیستم ذخیره ساز به عنوان یک تولید کننده انرژی برای منابع تجدیدپذیر عمل می کند و می تواند برای تغییرات کوتاه مدت توان خروجی منابع تجدیدپذیر انرژی را جبران سازی نماید. به دلیل اینکه ذخیره سازها می تواند جبران سازی توان اکتیو سریع انجام دهد، می تواند برای بهبود عملکرد کنترل فرکانس بار مورد استفاده قرار گیرد. ریزشبه مورد آزمایش، شامل: واحدهای تولید پراکنده دیزل ژنراتور، فتوولتاییک، پیل سوختی به همراه الکتروایزر و توربین بادی و واحدهای ذخیره کننده انرژی پراکنده چرخ طیار و باتری است. در این مقاله کنترل فرکانس ریزشبه با استفاده از ذخیره سازها به کمک الگوریتم بهینه سازی وال مطالعه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که تابع هدف با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی بسیار مطلوب می باشد.

دریافت مقاله: ۰۵/۰۹/۱۴۰۳

پذیرش مقاله: ۰۵/۰۲/۱۴۰۴

کلمات کلیدی: کنترل فرکانس ریزشبه، الگوریتم بهینه سازی وال، سیستم ذخیره انرژی.

۱-مقدمه^۱

۱- مفهوم ریزشبه به مجموعه ای از بارها، منابع تولید و ذخیره انرژی گفته می شود که به صورت یک بار قابل کنترل یا ژنراتور عمل کرده و می توانند توان و حرارت را برای یک ناحیه محلی فراهم نمایند. این مفهوم الگوی جدیدی را برای بهره برداری تولیدات پراکنده در سطح

شبکه توزیع ارائه نموده و امکان کنترل محلی و سازماندهی خودکار بهره برداری تولید پراکنده را فراهم می نماید. وضعیت های بهره برداری ریز شبکه، بسته به سطح تبادلات بین ریز شبکه و شبکه اصلی می تواند به صورت مستقل یا متصل به شبکه طبقه بندی گردد. در وضعیت مستقل اتصالی بین ریز شبکه و شبکه اصلی وجود ندارد و ریز شبکه باید خود پایدار گردد. ریز شبکه های متصل به شبکه، شبکه اصلی را به عنوان پشتیبان در اختیار دارند. همچنین آنها

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: هادی مهدوی

۱. ۳. ۲. دانشکده مهندسی برق، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

۴. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

برهمن اساس در این مقاله روشی جهت کنترل فرکانس ریزشبه در حالت جزیره ای با استفاده از ذخیره سازها به کمک الگوریتم بهینه سازی وال (WOA) پیشنهاد شده است.

می توانند در زمان های مشخصی از شبانه روز یا در تعمیرات برنامه ریزی شده تجهیز شبکه اصلی به صورت مستقل کار کنند. اجتماع تولیدات پراکنده نظیر فتوولتائیک و توربین بادی و همچنین نوسانات بزرگ بار منجر به ایجاد مساله ای مهم از پایداری فرکانسی شده است. به منظور عملکرد رضایت بخش یک سیستم قدرت ثبات فرکانس امری الزامی است. ثبات فرکانس یک سیستم قدرت بستگی به تعادل توان حقیقی دارد و از آنجا که فرکانس عامل مشترکی در سرتاسر سیستم است، هر تغییری در تقاضای توان حقیقی یک نقطه به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می شود. از اینرو تعادل تولید و مصرف ریزشبه، یکی از مهمترین ضروریات مدیریت ریزشبه است. در حالت اتصال به شبکه، تعادل تولید و مصرف در ریزشبه توسط تبادل توان با شبکه اصلی به دست می آید. ولی در حالت جدا از شبکه از آنجایی که منابع مورد استفاده در ریزشبه نظیر دیزل ژنراتورها پاسخ زمانی کندی دارند و همچنین منابع تجدیدپذیر دارای تولید تناوبی می باشند در صورت قطع ریزشبه از شبکه اصلی و یا تغییر بار در حالت ایزوله، قادر به تأمین سریع توان بالانس ریزشبه نبوده، در نتیجه ولتاژ و فرکانس دچار نوسان می شوند و ممکن است ریزشبه از دست برود [۱]. به همین دلیل در ریزشبه ها عموماً از منبع ذخیره ساز انرژی و استراتژی قطع بار برای ادامه عملکرد پایدار ریزشبه، در لحظه جدا شدن ریزشبه از شبکه بالا دست و حالت عملکرد ایزوله، استفاده می شود عملکرد مناسب یک ریزشبه تنها در صورت وجود یک سیستم کنترل مناسب امکانپذیر است. تحت شرایط عادی سیستم، ریزشبه به شبکه سراسری متصل بوده و بارها از طریق منابع محلی یا در صورت نیاز از طریق شبکه سراسری تغذیه می شوند. اما در صورت بروز اغتشاش در سیستم، تولید و بار متناظر یک ریزشبه می توانند از شبکه توزیع جدا شود، تا بارهای ریزشبه از اغتشاش مصون بمانند. بنابراین توانایی ریزشبه در جزیره ای شدن از سیستم، می تواند باعث کاهش قطعی برق مصرف کننده و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان شبکه شود.

برای همین مسئله در سال های اخیر مطالعات زیادی در حوزه کنترل فرکانس ریزشبه در حالت جزیره ای صورت گرفته؛ که الگوریتم های فرا اکتشافی به دلیل عملکرد بهتر کنترل کننده سهم بسزایی در این مورد داشته است.

۲- معرفی منابع ذخیره انرژی

انرژی الکتریکی در یک سیستم جریان متناوب نمی تواند به صورت الکتریکی ذخیره شود و باید در زمانی که به آن نیاز است تولید گردد. با این وجود برای ذخیره سازی این انرژی می توان آن را به صورت های دیگر انرژی تبدیل نمود که البته هر نوع سیستم برای کارایی مناسب نیاز به وجود یک میدل خوب دارد. بنابراین استفاده از منابع ذخیره ساز انرژی الکتریکی^۲ (ESS)، برای ذخیره سازی توان و استفاده در صورت نیاز شبکه یکی از راهکارهایی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سیستم های ذخیره انرژی، نقش مهمی را در پایداری فرکانسی و تعادل میان تولید و مصرف ریز شبکه ها ایفا می کنند. این سیستمها در مواقع کاهش بار شروع به ذخیره انرژی نموده و در مواقع افزایش بار از انرژی ذخیره شده برای تأمین بار اضافی استفاده کرده و تعادل میان تولید و مصرف در ریز شبکه را حداقل برای تأمین بارهای ضروری فراهم می نمایند. بنابر تعریف یک سیستم فیزیکی با قابلیت اخذ انرژی برای توزیع و جایگزینی الکتریسیته در زمانهای بعد را یک منبع ذخیره ساز انرژی الکتریکی می نامند. در این قسمت با توجه به اهمیت منابع ذخیره ساز در شبکه هوشمند به بررسی انواع تکنولوژی های ذخیره سازی می پردازیم [۲]. زمانی که حالت بهره برداری جزیره ای اتفاق می افتد یک DG یا گروهی از منابع DG تغذیه سیستم ریز شبکه را که از شبکه برق جدا شده است ادامه می دهند، در این حالت لازم است که یکی از ژنراتورها به عنوان ژنراتور اصلی پشتیبانی فرکانسی و ولتاژی انجام دهد. به طور کلی، یک ژنراتور سنکرون برای رفع این نیاز در نظر گرفته می شود [۳]. زمانی که ژنراتور سنکرون وجود نداشته باشد، میدل منبع ولتاژ (VSC) که به باتری ها متصل می باشد، این عمل اصلی را می تواند انجام دهد. اساس کار منابع ذخیره کننده انرژی مبتنی بر تعادل میان تولید و مصرف است که از جمله این و سایل می توان به باتری ها، سوپر خازن ها و چرخ طیارها اشاره کرد. در واقع منابع ذخیره کننده انرژی همانند ذخیره چرخان در سیستم های قدرت مرسوم عمل می کنند یعنی هنگامی که تولید بیشتر از مصرف است این منابع شارژ شده و در زمان های اضافه بار که ریز شبکه با کمبود تولید روبرو می شود با تزریق توان به شبکه از افت فرکانس و ولتاژ جلوگیری می کنند.

۳- مطالعات پیشین

تحقیقات متعددی در زمینه کنترل فرکانس ریز شبکه ها ارائه شده اند. تحقیقات مذکور در زمینه کنترل کننده ها به دو دسته کلی تقسیم می شوند؛ کنترل کننده های مبتنی بر روش های مرسوم و کنترل کننده های مبتنی بر الگوریتم ها فرا ابتکاری. در ادامه به برخی از روش های پیشنهادی در هر دو حوزه مورد نظر پرداخته می شود.

در مقاله [۴] یک روش مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی نهنک ترکیبی با تربید شبیه سازی شده برای طراحی کنترل کننده فرکانس بار سیستم قدرت هیبریدی پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی در این مطالعه یک استراتژی برای مدیریت چالش های حیاتی که به دلیل نفوذ انرژی خورشیدی و بادی برای پویایی عملیاتی آنها مواجه می شوند، ارائه می دهد. برتری رویکرد پیشنهادی با پیشنهادی نسبت به برخی از نتایج تحقیقات و با اعتبارسنجی بلادرنگ تأیید شده که اثربخشی در بهبود عملکرد را در مقایسه با رویکردهای سنتی توجیه می کند. در مقاله [۵] کنترل فرکانس بار با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و کنترل کننده PID برای نظارت موثر بر خط انتقال پیشنهاد شده است. این مقاله بر مدل سازی، بهینه سازی، تکنیک های کنترل پیشرفته، دانش تخصصی، و اصلاح مکرر سیستم قدرت برای کمک به دستیابی به تنظیمات PID مناسب که کنترل قابل اعتماد فرکانس بار در خط انتقال را فراهم می کند، تمرکز دارد. شاخص های عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با خطای مطلق زمان انتگرال اندازه گیری شده که ۰.۰۰۵۷۵۷ با ۰.۹۹۹۴ است. در مطالعه [۶] کنترل فرکانس بار در یک ریز شبکه ایزوله با استفاده از مدل کنترل پیش بینی توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. طرح کنترل پیشنهادی برای بهینه سازی و اصلاح مداوم ضرایب کنترل کننده استفاده می کند. پارامترهای مدل کنترل پیش بینی به طور خاص پارامتر وزن نرخ کنترل ورودی، افق پیش بینی و افق کنترل با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده اند. اغتشاشات فرکانس که پس از نوسانات توان در ریز شبکه به دلیل عدم تعادل توان رخ می دهد توسط کنترل کننده پیشنهادی با ارسال سیگنال کنترلی به منابع به حداقل رسیده است. در مقاله [۷] یک فرمول تنظیم چند هدفه جدید برای کنترل کننده های فرکانس بار در یک ریز شبکه ایزوله با اینرسی پایین

² Energy Storage System

* Corresponding author.

E-mail address: [email of correponding author](mailto:email_of_correponding_author)

پیشنهاد شده است. تنظیم فرمول تنظیم چند هدفه پیشنهادی در مقایسه با چهار تابع هدف مختلف، که عبارتند از خطای مطلق-انتگرال، خطای مطلق زمان انتگرال، خطای مربع انتگرال و خطای مربع زمان انتگرال ارزیابی شده است. در روش ارائه شده از الگوریتم بهینه سازی خرگوش های مصنوعی برای بهینه سازی تنظیمات کنترل کننده با ترکیب غیرخطی های سیستم با محدودیت های نرخ تولید حداکثر منابع فرمول تنظیم چند هدفه استفاده شده است. در مطالعه [۸] از الگوریتم رقابتی استعماری برای کنترل فرکانس بار در سیستم ریز شبکه چندگانه پیشنهاد شده است. کنترل کننده پیشنهادی شامل یک کنترل کننده مشتق متناسب مرحله اول با فیلتر و یک کنترل کننده تناسبی-انتگرال (PI) در مرحله دوم است. برای توجیه اثربخشی تکنیک پیشنهادی، آن را با سایر تکنیک های به خوبی تثبیت شده مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی فاخته مقایسه شده است. در مطالعه [۹] روشی جهت تنظیم فرکانس سیستم ریز شبکه بهم پیوسته با استفاده از کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی حشرات یک روزه پیشنهاد شده است. سیستم پیشنهادی شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، واحدهای ذخیره انرژی و ژنراتور سنکرون است. نتایج مقایسه های اعتبارسنجی نشان می دهد که کنترل کننده پیاده سازی شده، فرکانس سیستم را تحت تغییرات مختلف تقاضای بار و منابع انرژی تجدیدپذیر تنظیم می کند. در مقاله [۱۰] کنترل فرکانس ریز شبکه جزیره ای بر اساس الگوریتم لیپانوف بهینه-هوشمند با در نظر گرفتن پویایی توان و عدم قطعیت های ارتباطی پیشنهاد شده است. اهداف این تحقیق شامل ۱- مدیریت و کنترل واحد ذخیره انرژی به ویژه باتری ها به منظور ایجاد مکانیزم پشتیبانی فرکانس در ریز شبکه. ۲- مدیریت و محافظت از باتری در برابر تغییرات جریان شارژ و دشارژ، کاهش نوسانات گذرا موثر بر باتری و همچنین جلوگیری از قطع شدن ناگهانی برق باتری. در مقاله [۱۱] روشی جهت بهبود کیفیت توان ریز شبکه جزیره ای با کنترل ولتاژ و فرکانس بر اساس الگوریتم ژنتیک ترکیبی و بهینه سازی ازدحام ذرات پیشنهاد شده است. ویژگی هایی که در این مطالعه در نظر گرفته شده شامل کنترل ولتاژ و فرکانس، پاسخ دینامیکی و پاسخ حالت پایدار است، به ویژه زمانی که ریز شبکه در حالت جزیره ای کار می کند یا زمانی که تغییر بار وجود دارد. نتایج شبیه سازی در نرم افزار MATLAB/SIMULINK نشان می دهد که سیستم کنترل پیشنهادی توانسته است کیفیت توان را به خوبی بهبود بخشد. در مقاله [۱۲] کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت چند منبعی با استفاده از بهینه سازی ازدحام ذرات پیشنهاد شده است. تکنیک بهینه سازی ازدحام ذرات برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID، با خطای مطلق زمان انتگرال به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی و پایداری روش کنترل کننده PSO-PID در سناریوهای مختلف برای شبکه های پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته نتایج به وضوح نشان می دهد که از نظر پاسخ های فرکانسی، کنترل کننده PSO-PID بهتر از کنترل کننده PID معمولی عمل می کند. در مقاله [۱۳] یک کنترل فرکانس بهینه سیستم برق ریز شبکه یکپارچه انرژی سبز با استفاده از الگوریتم بهینه ساز عنکبوت اصلاح شده پیشنهاد شده است. اثربخشی تکنیک بر حسب شاخص های عملکرد حالت پایدار و گذرا برای پاسخ انحراف فرکانس ارزیابی شده است. با توجه به نتایج ارزیابی شده انحراف فرکانس به دست آمده در شرایط دینامیکی مختلف، کنترل کننده پیشنهادی به طور قابل توجهی شاخص های گذرا مانند زمان ته نشینی، خطای کنترل، و بیش از حد پیک را تا حد ۳۹٫۸ درصد، ۱۱٫۷ درصد و ۶۸٫۹ درصد بهبود بخشید. در مقاله [۱۴] تقویت کنترل کننده های مر سوم برای کنترل فرکانس بار ریز شبکه های ایزوله با استفاده از فرمول بندی چند هدفه پیشنهادی از طریق الگوریتم بهینه سازی خرگوش های مصنوعی پیشنهاد شده است. از الگوریتم بهینه سازی خرگوش مصنوعی برای تنظیم همزمان پارامترهای کنترل کننده برای چندین منبع کنترل شده در ریز شبکه های ایزوله اعمال شده است. با انجام تجزیه و تحلیل در این مطالعه، تغییرات شدید ۲۵٪ در پارامترهای سیستم تضمین می کند که استراتژی تنظیم پیشنهادی سیستم را پایدار نگه می دارد.

۴- مدل سازی مساله و الگوریتم WOA

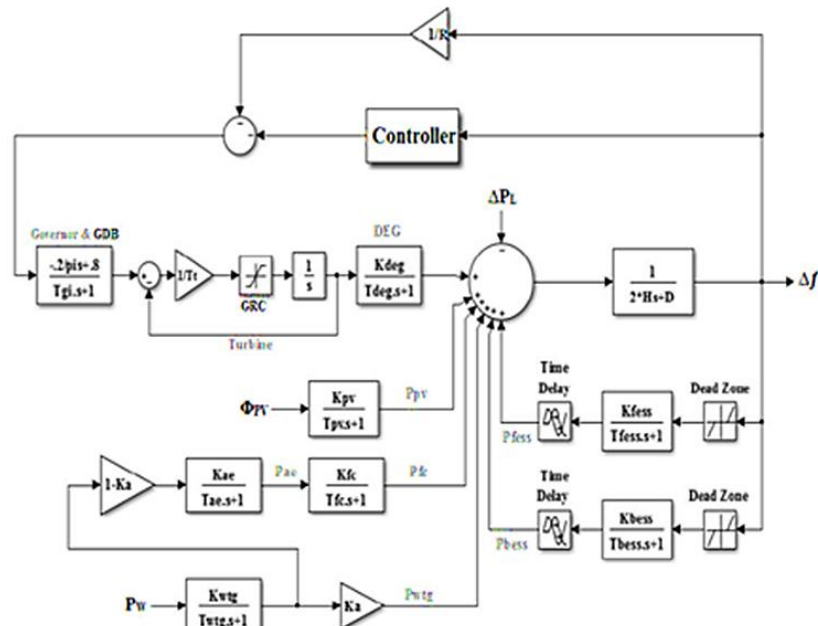
پایداری یک سیستم قدرت برای شرایط کاری اولیه داده شده عبارتست از توانایی سیستم جهت بازیابی حالت تعادل پس از یک اغتشاش فیزیکی به طوری که غالب متغیرهای سیستم محدود و کل سیستم عملاً بی عیب باقی بماند. زمانی که سیستم قدرت تحت یک اغتشاش قرار می گیرد پایداری آن به شرایط کاری اولیه و همچنین ماهیت اغتشاش وابسته است. پایداری سیستم قدرت ویژگی آن سیستم برای حرکت در اطراف نقطه تعادل (مثلاً شرایط کاری اولیه) است. در نقطه تعادل، تمامی نیروهای مخالفی که در سیستم وجود دارند به صورت لحظه ای با هم در تعادل خواهند بود. تمایل سیستم قدرت برای ایجاد نیروهای بازیابی برابر یا بیشتر از نیروهای اختلال وارد شده به آن، به منظور نگهداری حالت تعادل سیستم را پایداری می گویند. اگر نیروهایی که سعی دارند ماشین ها را با یکدیگر در حالت همگام حفظ نمایند، به قدر کافی بزرگ باشند تا بر نیروهای اختلال غلبه کنند، سیستم پایدار (در حالت همگام) باقی می ماند [۱۵]. نقطه تعادل سیستم قدرت ممکن است برای یک اغتشاش فیزیکی (بزرگ)، پایدار باشد و برای اغتشاش دیگر ناپایدار باشد. طراحی سیستم های قدرت به نحوی که برای هر اغتشاش احتمالی، پایدار باشد عملی و اقتصادی نخواهد بود. معمولاً در طراحی، حالت های اضطراری که احتمال وقوع

بالایی دارند مد نظر قرار می‌گیرند. در سیستم قدرت رنج وسیعی از اغتشاش‌های کوچک و بزرگ رخ می‌دهد. اغتشاش‌های کوچک به شکل تغییرات مداوم بار بوده که در این حالت سیستم باید بتواند خود را با این شرایط منطبق نماید و عملکرد قابل قبولی داشته باشد. همچنین، سیستم باید قادر باشد در پی وقوع اغتشاش‌های شدید از قبیل اتصال کوتاه در یک خط انتقال یا خروج یک ژنراتور بزرگ، در حالت سنکرون باقی بماند. یک اغتشاش بزرگ ممکن است به تغییراتی در ساختار سیستم منجر شود. پاسخ سیستم به یک اغتشاش ممکن ناشی از عملکرد تجهیزات آن می‌باشد. برای مثال، خطا در یک جزء حساس و قطع آن به وسیله رله‌های حفاظتی منجر به تغییراتی در توان‌های عبوری از خطوط، ولتاژ شین‌های شبکه و سرعت رتور ماشین‌ها می‌شود. تغییرات ولتاژ، موجب عملکرد تنظیم‌کننده‌های ولتاژ ژنراتورها و شبکه انتقال می‌شود و تغییرات سرعت ژنراتورها، موجب عملکرد گاورنرها خواهد شد. همچنین تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می‌شود که بارهای سیستم با توجه به مشخصه‌هایشان به درجات متفاوتی تغییر نمایند. با از مدار خارج کردن عناصر تحت خطا، برای حفظ پیوستگی عملکرد، ممکن است بخش عمده‌ای از سیستم عمداً قطع شوند. همچنین این احتمال وجود دارد که در پی وقوع اغتشاش‌های شدید خاص، سیستم‌های متصل به هم، برای حفظ حداکثر مقدار ممکن تولید و بار، عمداً به دو یا تعداد بیشتری جزیره^۳ تقسیم شوند. عملکرد سیستم‌های کنترل اتوماتیک و احتمالاً اپراتورهای انسانی ممکن است سرانجام سیستم را به حالت نرمال بازگرداند. به عبارت دیگر، اگر سیستم ناپایدار باشد، شرایط خطرناکی مانند افزایش تدریجی زاویه رتور ژنراتورها یا کاهش تدریجی ولتاژ شین‌ها به وجود می‌آید. این شرایط ناپایدار می‌تواند به خروج‌های پی‌درپی و خاموشی بخش بزرگی از سیستم منتهی شود.

۱-۴- مطالعه پایداری فرکانس

به منظور عملکرد رضایت بخش یک سیستم قدرت ثبات فرکانس امری الزامی است، چرا که کنترل نسبتاً دقیق فرکانس ثبات سرعت موتورهای سنکرون و القایی را به دنبال دارد و تثبیت سرعت بارهای موتوری، به طور ویژه در عملکرد رضایت بخش واحدهای تولید اهمیت دارد زیرا این واحدها به شدت به عملکرد تمامی محرک‌های جنبی مربوط به سوخت، آب و سیستم‌های تغذیه هوای احتراق وابسته اند. همچنین در یک شبکه ممکن است افت زیاد فرکانس منجر به ایجاد جریان‌های شدید مغناطیسی در موتورهای القایی و ترانسفورماتورها شود و صدمات جبران ناپذیری وارد نماید. ثبات فرکانس یک سیستم قدرت بستگی به تعادل توان اکتیو دارد و از آنجا که فرکانس عامل مشترکی در سرتاسر سیستم است، هر تغییری در تقاضای توان اکتیو یک نقطه به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می‌شود و نظر به اینکه توان مورد نیاز یک سیستم قدرت بزرگ، توسط تعداد زیادی ژنراتور تامین می‌شود باید تغییر توان مورد تقاضا را بین واحدها تقسیم نمود. البته تقسیم بار بین ژنراتورها و کنترل اولیه سرعت توسط گاورنرهای نصب شده بر روی ژنراتورها صورت می‌پذیرد، لیکن جهت تنظیم دقیق فرکانس در مقدار نامی نیاز به یک کنترل تکمیلی می‌باشد که باید در یک مرکز کنترل اصلی انجام شود. اولین مرحله در تحلیل و طراحی یک سیستم کنترل ارائه مدل ریاضی مناسب برای سیستم است. دو روش که اغلب مورد استفاده واقع می‌شوند عبارتند از: روش تابع انتقال و روش متغیر حالت. روش متغیر حالت می‌تواند هم برای سیستم‌های خطی و هم غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. جهت استفاده از تابع انتقال و معادلات حالت خطی باید معادلات سیستم حول نقطه کار خطی شوند. سیستم قدرت یک سیستم غیرخطی می‌باشد که می‌توان آن را به وسیله یک سری معادلات غیر خطی مدل نمود. برای بررسی پایداری سیستم قدرت در یک نقطه کاری، با فرض ورودی سیگنال کوچک (ورودی‌ای که باعث تغییر نقطه کار سیستم قدرت نمی‌شود) می‌توان معادلات غیر خطی را حول نقطه کار خطی نمود. با بررسی سیستم خطی شده مشاهده می‌گردد که پاسخ سیستم دارای میرایی لازم نمی‌باشد و حتی در برخی نقاط کار ناپایدار می‌باشد. جهت پایداری سیستم قدرت از پایداری‌سازهای سیستم قدرت استفاده می‌گردد.

در یک تقسیم‌بندی کلی روند طراحی پایداری‌سازهای سیستم قدرت را می‌توان به دو قسمت تقسیم نمود: یکی از این روش‌ها، مبتنی بر طراحی یک کنترل کننده برای یک سیستم قدرت است، و دیگری مبتنی بر تعیین فیدبک‌های گینی برای پایداری‌سازی سیستم می‌باشد. در روش مبتنی بر تابع تبدیل، از تغییرات سرعت ژنراتور $\Delta\omega(t)$ فیدبک گرفته و سیگنالی به عنوان مکمل ولتاژ تحریک ایجاد می‌شود. هنگام طراحی PSS به روش سنتی، مکان هندسی قطب‌های سیستم اهمیتی ندارد و تنها مسئله مورد بررسی، پایداری‌سازی حلقه فیدبک می‌باشد.



شکل (۱): مدل فرکانسی ریزشیکه با منابع تولید و ذخیره انرژی پراکنده

شکل ۱ مدل فرکانسی ریزشیکه مورد مطالعه [۱۶] را نشان می‌دهد. این سیستم دارای سه ورودی است که به سیستم اعمال می‌شوند. ورودی اول: شار تابش خورشید (ϕ_{pv}) است که به عنوان ورودی پانل خورشیدی است که ورودی آن در حالت نرمال و هنگام وقوع اغتشاش نیز نمایش داده شده است.

ورودی دوم: سرعت باد است که این نیز به عنوان تابع ورودی محاسبه توان مکانیکی (PW) توربین بادی اعمال می‌شود. مقدار این کمیت نیز مشابه شار تابش خورشید برای حالت‌های مختلف نمایش داده شده است.

ورودی سوم: میزان اضافه بار (ΔPL) است که به صورت پریونیت تحت اغتشاش‌های مختلف به کل سیستم اعمال می‌شود

۲-۴- مدل ریاضی الگوریتم بهینه ساز

در این بخش ابتدا مدل ریاضی محاسبه طعمه، مانور تغذیه ای شبکه حبایی و جستجو برای طعمه برای اولین بار ارائه شده است [۱۷]. سپس الگوریتم WOA ارائه شده است:

$$D = |C \cdot x_{rand} - x| \quad (1)$$

$$X(t+1) = X_{rand} - A \cdot D \quad (2)$$

که t شماره تکرار فعلی را نشان می‌دهد و A و C بردارهای ضرایب می‌باشند X^* بردار موقعیت بهترین راه حل بدست آمده تاکنون می‌باشد و X بردار موقعیت می‌باشد. $\| \cdot \|$ مقدار مطلق و $\cdot$ ضرب مولفه در مولفه می‌باشد. لازم است توجه شود که X^* باید در هر تکرار بروزرسانی شود اگر راه حل بهتری باشد. بردار A و C بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$C = 2 \cdot r \quad (3)$$

$$A = 2a \cdot r - a \quad (4)$$

$$X(t+1) = D \cdot e^{bi} \cdot \cos(2\pi 1) + x^*(t) \quad (5)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} x^*(t) - A \cdot D & \text{if } p < 0.5 \\ D \cdot e^{bi} \cdot \cos 2 + x^*(t) & \text{if } p > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

که p یک عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. علاوه بر این برای روش حبایی، نهنک‌های کوهان دار بصورت تصادفی به جستجوی شکار می‌پردازند. مدل ریاضی جستجو به شرح زیر می‌باشد.

۳-۴- جستجو برای طعمه (مرحله اکتشاف)

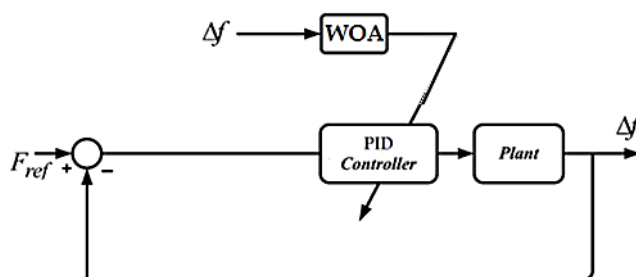
$$D = |C \cdot x_{rand} - x| \quad (7)$$

$$X(t+1) = x_{rand} - A \cdot D \quad (8)$$

که بردار X_{rand} یک بردار موقعیت تصادفی است (یک نهنگ تصادفی) که از جمعیت فعلی انتخاب شده است. از نقطه نظر تئوری، WOA می‌تواند بعنوان یک بهینه‌ساز عمومی و گلوبال در نظر گرفته شود چون که شامل توانایی اکتشاف و بهره‌برداری می‌باشد.

۴-۴ اعمال الگوریتم WOA روی مساله

الگوریتم WOA جهت بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID مطابق با شکل ۲ اعمال خواهد شد. هدف کاهش انحرافات فرکانسی ریزش‌بکه تحت تغییرات بار با تنظیم بهینه ضرایب کنترل‌کننده PID می‌باشد.

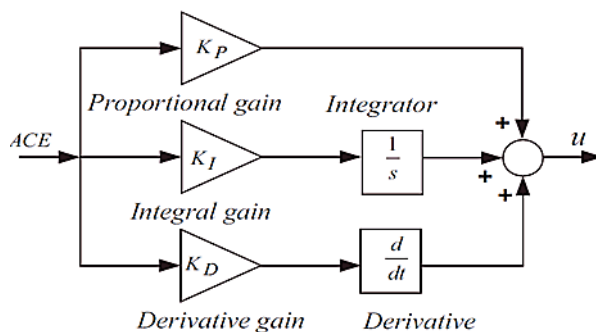


شکل (۲): سیستم حلقه بسته کنترل‌کننده PID مبتنی بر WOA

یک کنترل‌کننده PID می‌تواند به صورت یک جبران‌ساز پس‌فاز-پیش‌فاز با یک قطب در مبدا و دیگری در بینهایت می‌باشد. تابع تبدیل کنترل‌کننده PID اغلب با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

که $U(s)$ سیگنال کنترلی می‌باشد که روی سیگنال خطای $E(s)$ عمل می‌کند، K_p بهره تناسبی، T_i ثابت زمانی انتگرالی، T_d ثابت زمانی مشتق، و s آرگومان تبدیل لاپلاس می‌باشد. شکل ۳ نمایش دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده PID را نشان می‌دهد.



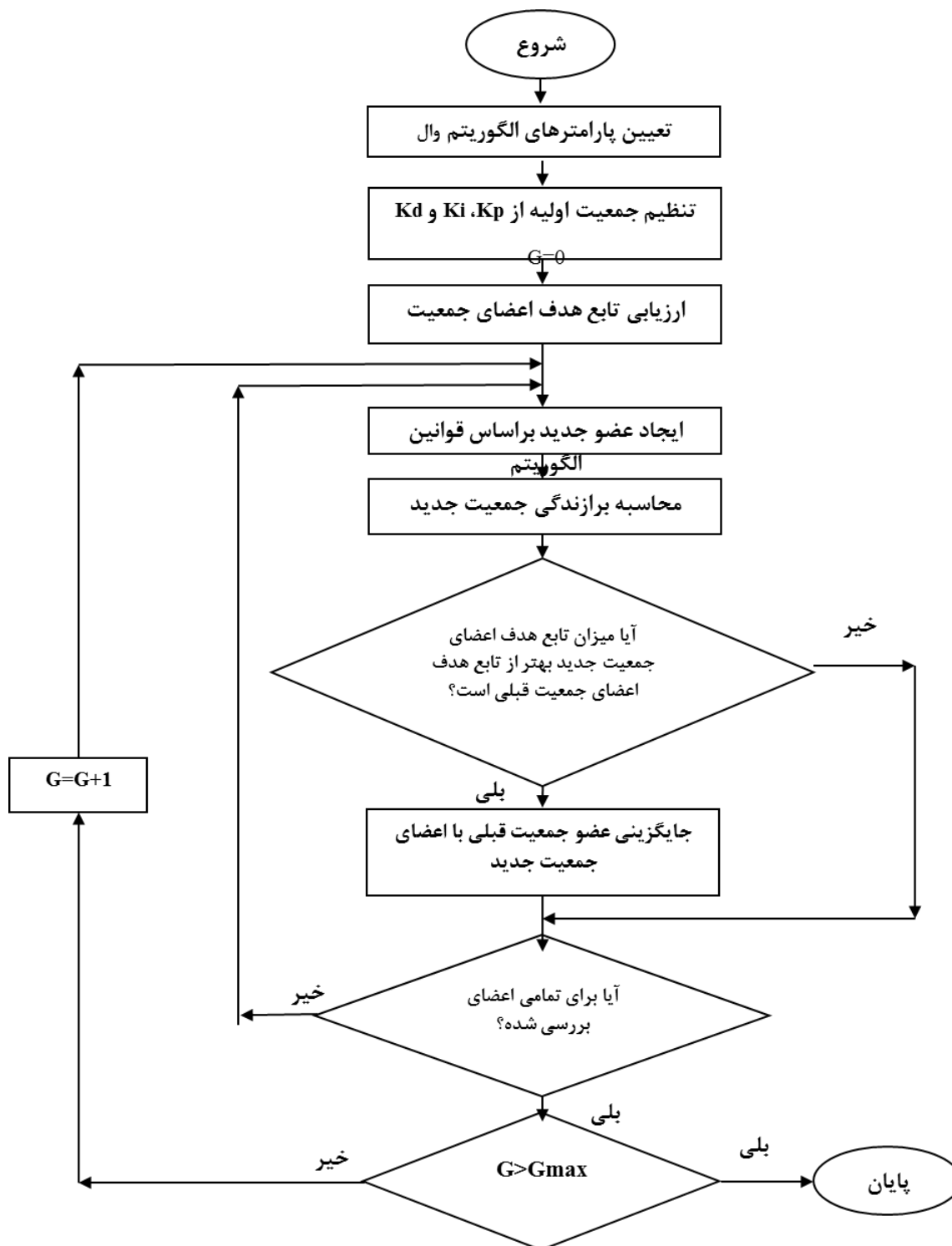
شکل (۳): نمایش دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده PID

عملکرد کنترل‌کننده PID شامل سه بخش زیر می‌باشد:

- ✓ بخش تناسبی یک عملکرد کنترلی متناسب با سیگنال خطا را روی سیستم اعمال می‌کند.
- ✓ بخش انتگرالی خطای حالت ماندگار را با جبران‌سازی فرکانس پایین کاهش می‌دهد.
- ✓ بخش مشتق‌گیر پاسخ‌گذا را با جبران‌سازی فرکانس بالا بهبود می‌بخشد.

الگوریتم بهینه‌سازی وال در طی فرآیند بهینه‌سازی سعی در تنظیم ضرایب K_p ، K_i و K_d خواهد داشت.

شکل ۴ فلوجارت اعمال الگوریتم بهینه‌سازی WOA روی مساله تعیین ضرایب بهینه K_p ، K_i و K_d در کنترل‌کننده PID را نشان می‌دهد.



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم WOA برای بهینه سازی کنترل کننده

۵-۴- تابع هدف مساله

به منظور طراحی بهینه کنترل کننده مورد مطالعه، تابع هدف مبتنی بر مشخصات مطلوب و قیود آن طرح می شود. ملاک عملکرد معمولاً در طراحی کنترل کننده، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا (ITAE)، در نظر گرفته می شود. در مطالعات مختلف تابع ITAE به عنوان بهترین تابع هدف برای مطالعات کنترل فرکانس بار گزارش شده است.

بنابراین در این تحقیق نیز ITAE به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی ضرائب تنا سبی، انتگرالی و بهره مشتق گیر کنترل کننده PID استفاده شده است. بیان تابع هدف ITAE به صورت معادله زیر تعریف می شود:

$$J = ITAE = \int_0^{t_{sim}} |\Delta F| \cdot t \cdot dt \quad (10)$$

در این معادله $|\Delta F|$ تغییرات فرکانس سیستم، t_{sim} بازه زمانی شبیه سازی است. قیود مساله حدود پارامتر کنترل کننده PID می باشد. بنابراین مساله طراحی می تواند به صورت مساله بهینه سازی زیر فرمول بندی شود:

$$\text{Minimize } J \quad (11)$$

subject to:

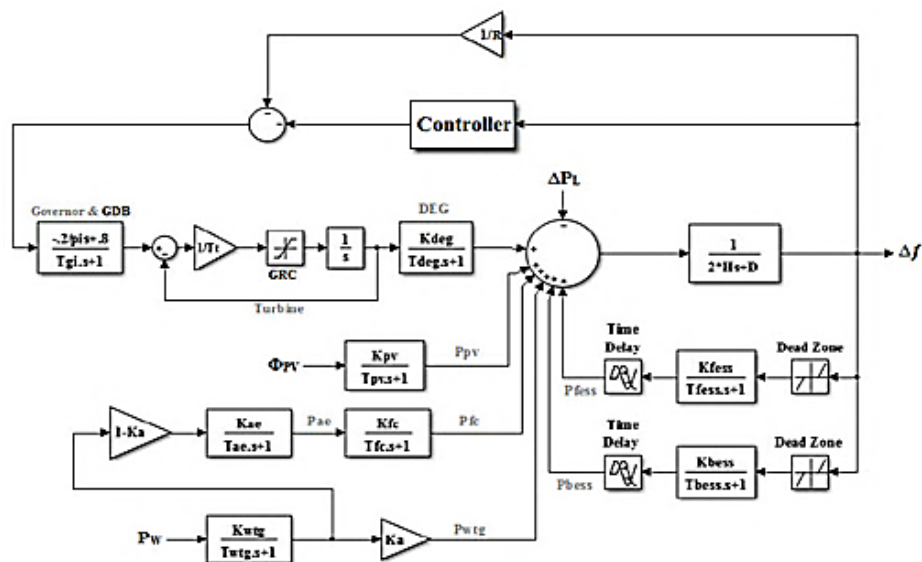
$$K_{Pmin} \leq K_P \leq K_{Pmax},$$

$$K_{Imin} \leq K_I \leq K_{Imax},$$

$$K_{Dmin} \leq K_D \leq K_{Dmax}$$

۵- نتایج شبیه سازی

شکل ۵ مدل فرکانسی ریز شبکه مورد آزمایش را با منابع تولید و ذخیره انرژی پراکنده نشان می دهد. مکان اتصال کنترل کننده روی مدل فرکانسی ریز شبکه مورد مطالعه روی شکل مذکور نشان داده شده است. همچنین بلوک های کنترلی ریز منابع فتوولتائیک، توربین بادی، سیستم پیل سوختی، دیزل ژنراتور، سیستم ریز شبکه، چرخ طیار و سیستم ذخیره ساز باتری در این شکل قابل مشاهده است. پارامترهای مدل فرکانسی سیستم و جزئیات مدلسازی عناصر این ریز شبکه در جدول ۱ ارائه می کند.

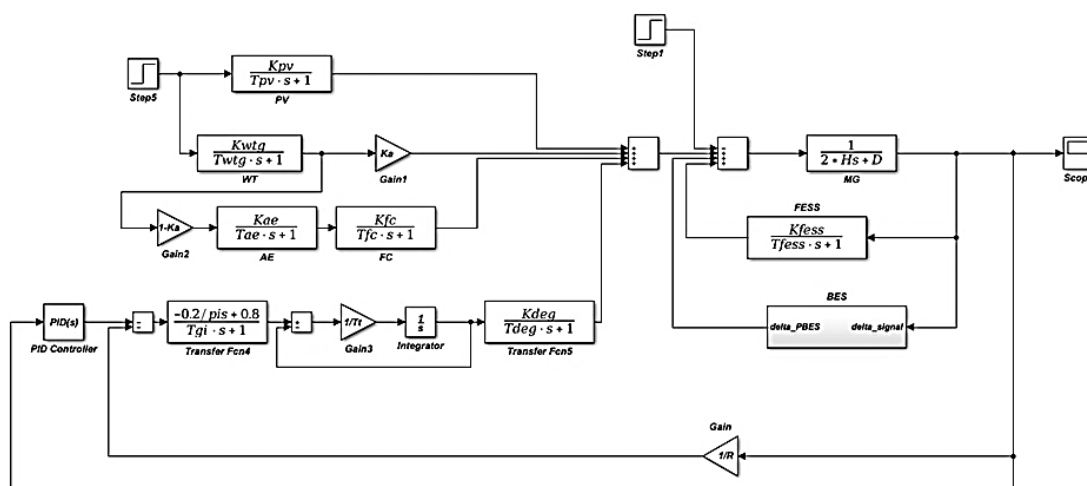


شکل (۵): مدل فرکانسی ریز شبکه مورد مطالعه

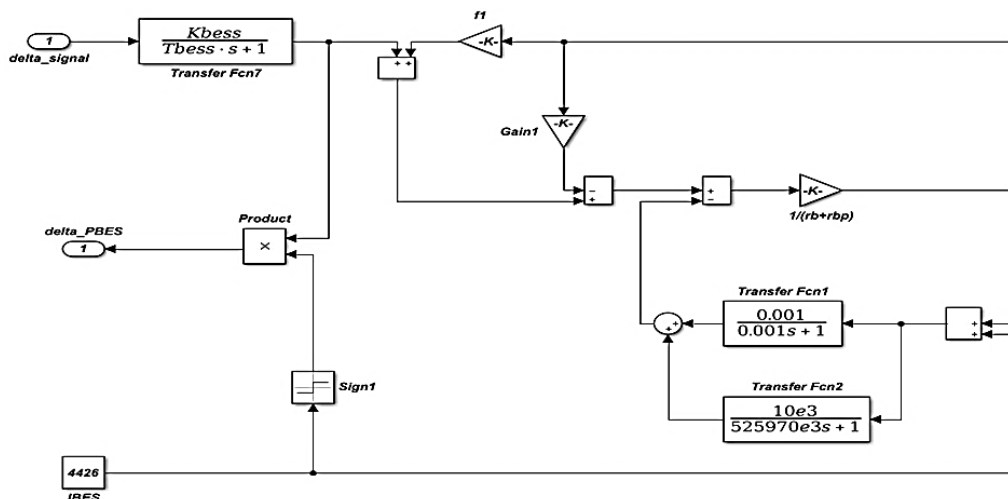
جدول (۱): مدل فرکانسی ریزش بکه مورد مطالعه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
R (Hz/pu)	۳	K _{ae}	۱,۶
D (Hz/pu)	۰,۰۱۲	T _{ae}	۰,۵
2H (pu s)	۰,۱۶۶۷	K _{fc}	۱,۲
K _{deg}	۱,۳	T _{fc}	۴
T _{deg}	۲	K _{pv}	۱,۸
T _t	۰,۳	T _{pv}	۱
T _{gi}	۰,۳	K _{fess}	-۱,۱
K _{wtg}	۱	T _{fess}	۰,۱
T _{wtg}	۱,۵	K _{bess}	-۱,۳
K _a	۰,۶	T _{bess}	۰,۱

ریز شبکه مورد مطالعه به صورت شکل ۶ در محیط متلب پیاده سازی شده است.



شکل (۶): ریزشبهه پیاده سازی شده در محیط MATLAB



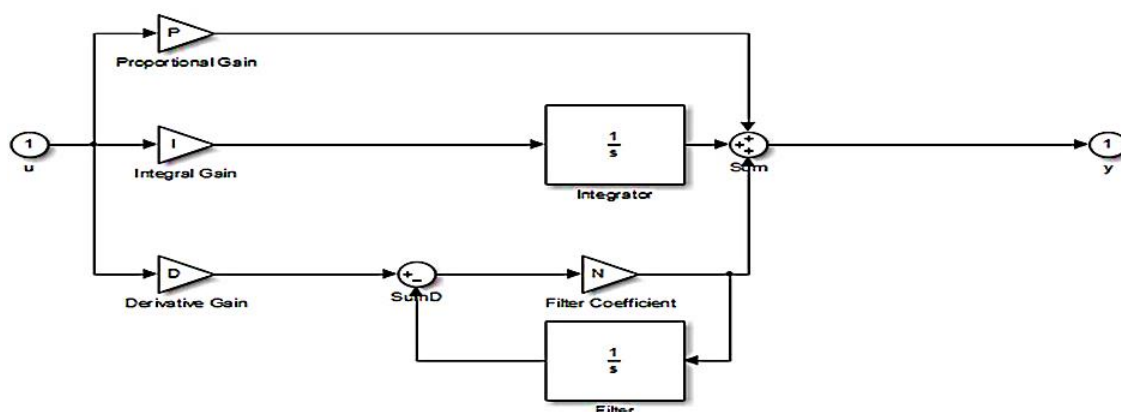
شکل (۷): بلوک دیاگرام مدل سازی شده برای باتری در محیط MATLAB

شکل ۷ بلوک دیاگرام مدل سازی شده برای باتری (BES) در محیط متلب را نشان می دهد. جدول ۲ مشخصات پارامترهای باتری مدلسازی شده در بخش قبلی را با جزئیات نشان می دهد.

جدول (۲): مدل فرکانسی ریزشبه مورد مطالعه

0.013 Ω	rbs	1755-2925 V	Voltage
0.0274 Ω	Xco	52597 F	Cbp
4.426 KA	I_{bes}⁰	10 k Ω	rbp
100 kV/pu MW	Kbes	1 F	Cb
0.026 s	Tbes	0.001 Ω	rb
15°	α°	0.0167 Ω	rbt

نمایش دیاگرام بلوکی کنترل کننده PID پیاده سازی شده در محیط MATLAB به صورت شکل ۸ می باشد.



شکل (۸): نمایش دیاگرام بلوکی کنترل کننده PID در محیط متلب

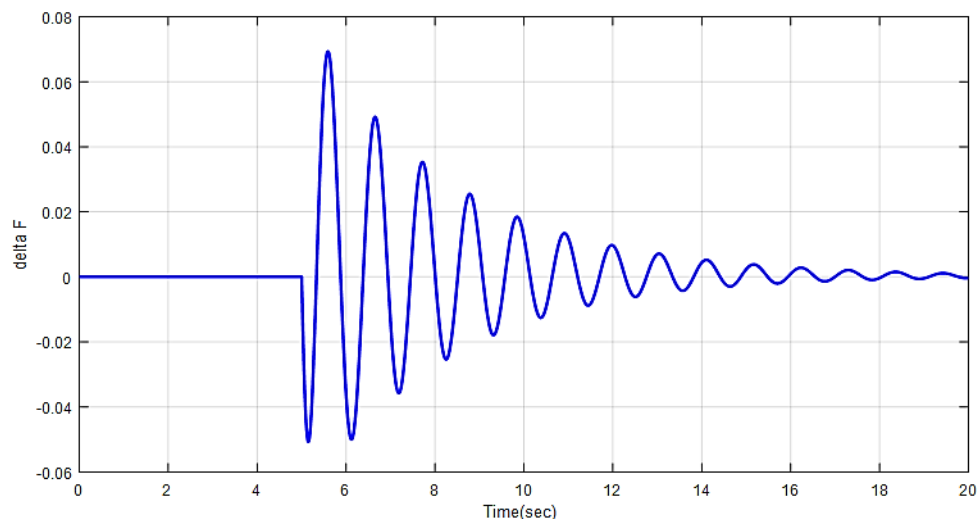
۱-۵- وضعیت اولیه ریزشبه با تغییر در بار

پاسخ فرکانسی ریزشبه بدون بهینه سازی ضرایب کنترل کننده PID و براساس مقادیر اولیه ضرایب K_p ، K_i و K_d به ترتیب ۴۰، ۹ و ۱۰ مورد تحلیل قرار گرفته است. تغییر در بار در ثانیه پنجم و به صورت افزایش ۱۰ درصدی افتاده است. کل

زمان شبیه سازی برای ۲۰ ثانیه اجرا شده است. شکل ۹ نشان می دهد که ریز شبکه در این حالت بعد از نوسانات شدید فرکانسی به پایداری فرکانسی رسیده است. طول زمان مورد نیاز جهت میراسازی و به عبارت دیگر زمان نشست بالایی در این بخش مورد نیاز است.

جدول (۳): نمایش دیاگرام بلوکی کنترل کننده PID در محیط متلب

پارامتر	مقدار
Kp	۴۰
Ki	۹
Kd	۱۰

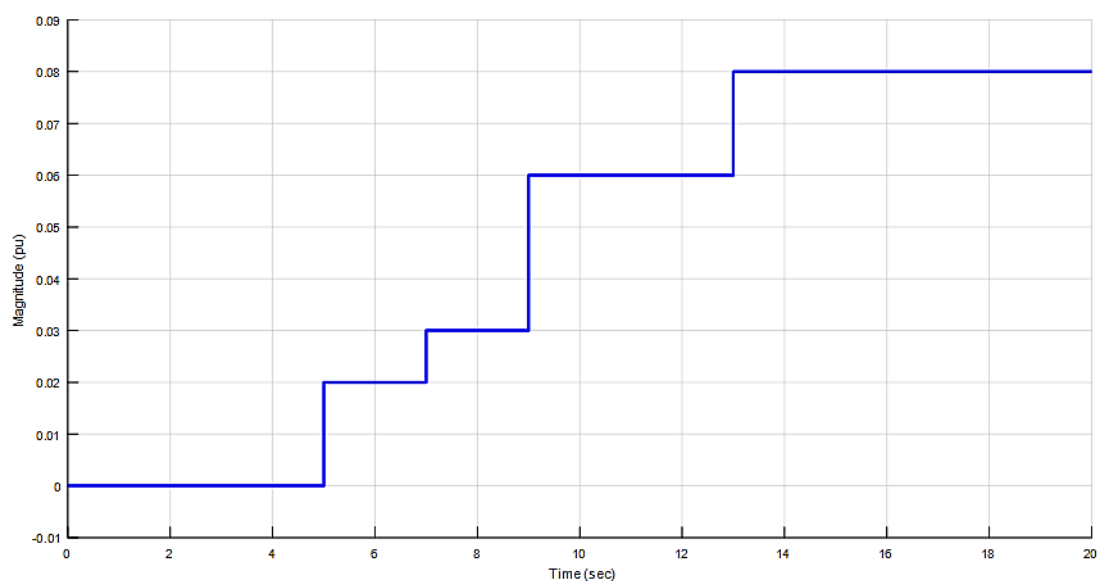


شکل (۹): تغییرات فرکانسی ریز شبکه در حالت اولیه

زمان نشست این پاسخ در بازه زمانی شبیه سازی فوق قابل محاسبه نبوده ولی ماکزیمم فراجش این پاسخ معادل ۰,۰۶۹۴ تغییرات فرکانسی می باشد.

۲-۵- وضعیت اولیه ریز شبکه با چندین تغییر در بار

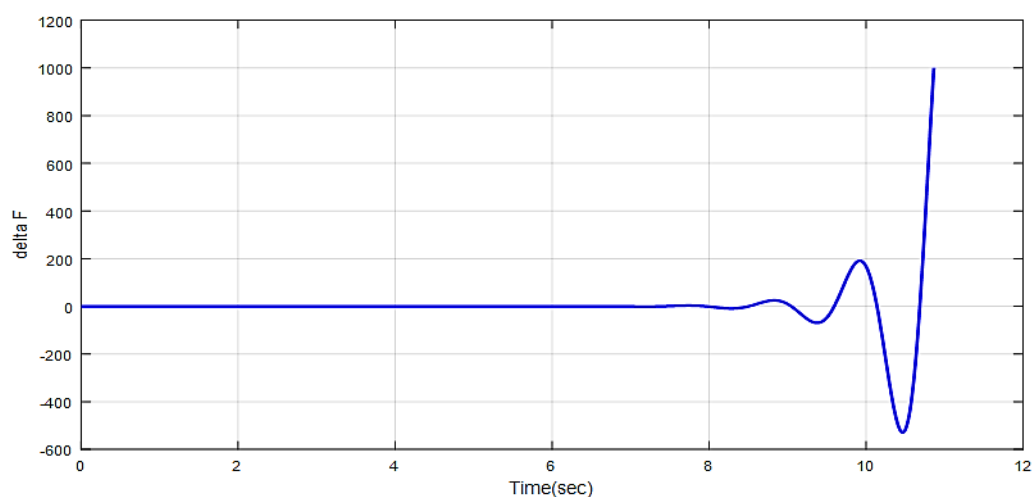
این وضعیت به صورت چندین تغییر در بار شبیه سازی شده است. مطابق شکل (۴-۷) در زمان $t=5$ s تغییر ۰,۰۲ پریونیت، در زمان $t=7$ s تغییر ۰,۰۳ پریونیت، در زمان $t=9$ s تغییر ۰,۰۶ پریونیت و در زمان $t=13$ s تغییر ۰,۰۸ پریونیت در بار لحاظ شده است. این بخش به ازای ضرایب K_p ، K_i و K_d به ترتیب ۹، ۴۰ و ۱۰ تحلیل شده است. به ازای تغییرات نشان داده شده در بار پایداری فرکانسی شبکه از دست رفته است و تا زمان $t=20$ s هنوز وضعیت نوسانی دارد.



شکل (۱۰): دامنه تغییرات چندباره در بار

۳-۲- ریزش شبکه بدون ذخیره سازی باتری

در طی عملکرد جزیره ای، تعادل توان بین تولید و تقاضا به صورت آنی برقرار نیست. در نتیجه فرکانس ریز شبکه نوسان خواهد کرد و تا زمانی که مکانیزم مناسبی برای متعادل کردن توان وجود نداشته باشد ممکن است سیستم را به خاموشی بکشاند. سیستم ذخیره انرژی در زمان میلی ثانیه پاسخ می دهد. واضح است که سیستم ذخیره انرژی باید نقش مهمی را در حفظ پایداری فرکانسی طی عملکرد جزیره ای ایفا نماید. تغییرات فرکانسی ریز شبکه بدون حضور ذخیره ساز باتری تحت تغییر ۱۰ درصدی بار در زمان $t=5$ s را نشان می دهد. در این بخش برای بررسی اثرات حضور ذخیره ساز باتری روی تغییرات فرکانسی ریز شبکه بلوک مربوطه از برنامه پیاده سازی شده حذف می گردد.



تغییرات فرکانسی ریز شبکه بدون حضور ذخیره ساز باتری شکل (۱۱):

بدون حضور بلوک ذخیره ساز باتری امکان میرا سازی نوسانات فرکانسی در این ریز شبکه وجود نداشته و توانی که در بازه زمانی جدا از شبکه صرف تامین توان اکتیو شبکه می گردید، بدون حضور باتری قابل تامین نبوده و همین مساله باعث ایجاد ناپایداری در فرکانس ریز شبکه و فروپاشی آن گردیده است.

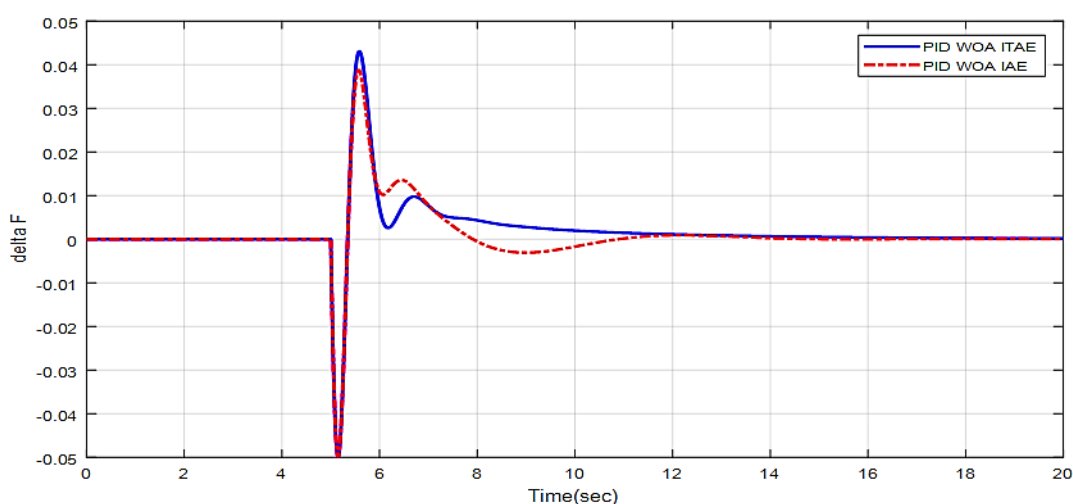
۴-۵- بهینه سازی با الگوریتم WOA تحت تغییر بار

به منظور تعیین بهینه ضرائب کنترل کننده PID و حذف نوسانات فرکانسی تحت تغییرات بار الگوریتم بهینه سازی وال در این بخش بکار گرفته شده است. با اجرای برنامه بهینه سازی WOA مقادیر جدول ۴ برای این کنترل کننده بدست آمدند.

در حالت اولیه ریز شبکه و بهینه سازی شده PID جدول (۴): ضرائب کنترل کننده

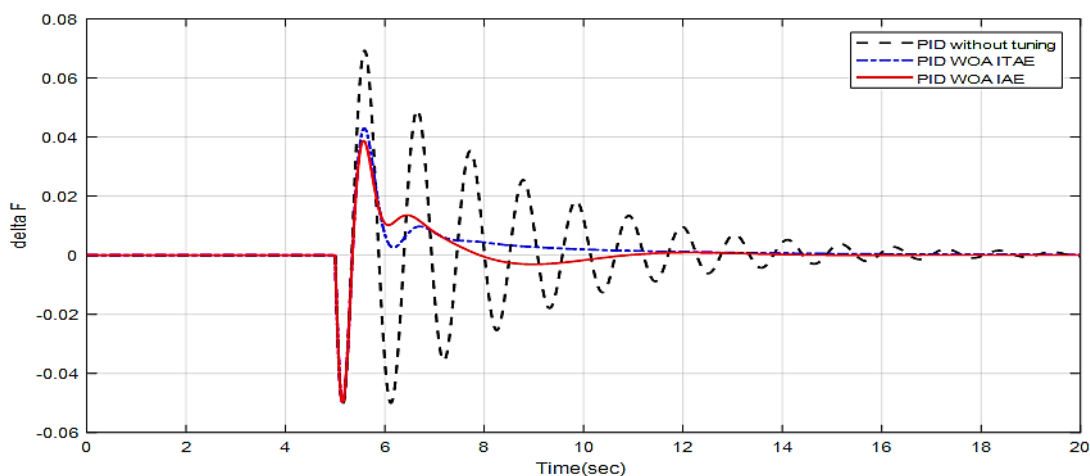
پارامتر	مقدار اولیه	با تابع هدف ITAE	با تابع هدف IAE
Kp	۴۰	۱۷,۵۲	۱۱,۰۵۵
Ki	۹	۶,۵۳	۱۲,۵۳۵
Kd	۱۰	۷,۵۵	۷,۶۴۱
شاخص ITAE	۰,۰۲۹۶	۰,۰۰۶۲	-
شاخص IAE	۰,۰۰۴۴	-	۰,۰۰۱۱

جدول ۴ مقادیر شاخص ITAE را قبل و بعد از انجام بهینه سازی نشان می دهد. همانطور که واضح است در طول فرآیند بهینه سازی مقدار این شاخص از ۰,۰۲۹۶ به ۰,۰۰۶۳ کاهش یافته است. شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی ریز شبکه تحت تغییر ۱۰ درصدی بار در زمان $t=5$ s را نشان می دهد. مطابق شکل اعمال کنترل کننده PID با تنظیمات مطابق جدول فوق منجر به پایداری سازی تغییرات فرکانسی ریز شبکه شده است.



شکل (۱۲): تغییرات فرکانسی ریز شبکه تحت تغییر بار بعد از بهینه سازی با WOA

شکل ۱۳ مقایسه نتایج این سناریو با نتایج تغییرات فرکانسی حالت اولیه ریزش‌بکه را نشان می‌دهد. همانطور که واضح است بهینه سازی ضرائب کنترل کننده PID باعث شده تا نوسانات فرکانسی در مقایسه با حالت اولیه بهبود چشمگیری یابد.



شکل (۱۳): مقایسه تغییرات فرکانسی ضریب بهینه با حالت اولیه ریزش‌بکه

مطابق شکل ۱۳ مقایسه تغییرات فرکانسی حالت تنظیم نشده PID با پاسخ فرکانسی بهینه سازی با تابع هدف ITAE و IAE با الگوریتم بهینه سازی WOA نشان می‌دهد که دو تابع هدف هم از نقطه نظر زمان نشست (۱۱,۰۴ ثانیه) و هم ماکزیمم فرجهش (در زمان ۵,۵۸۵ ثانیه دارای دامنه تغییرات فرکانسی ۰,۰۴۳) تقریباً دارای وضعیت مشابهی هستند.

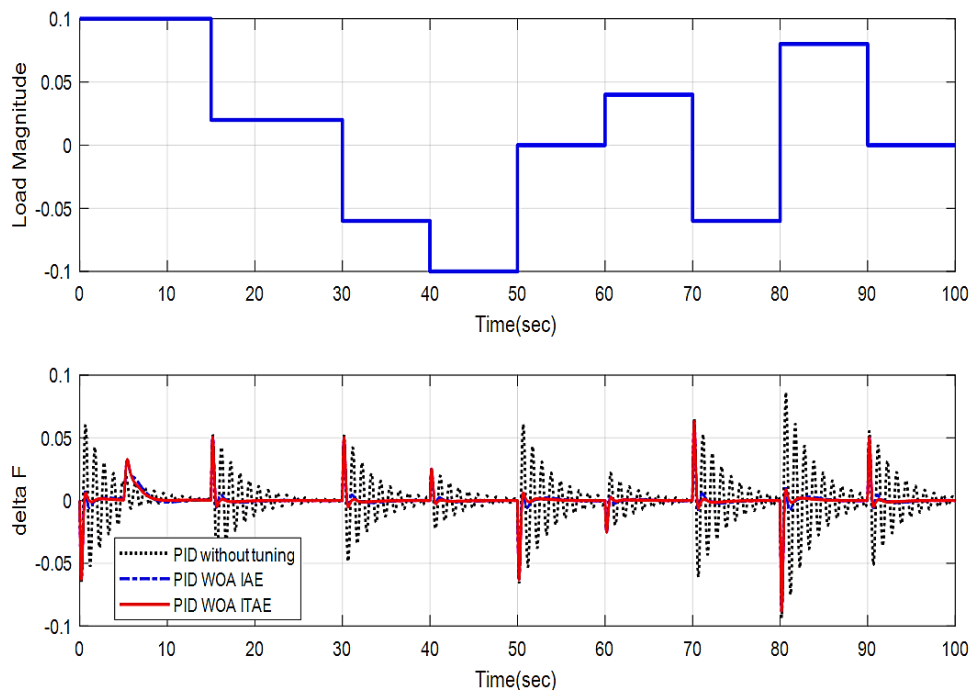
۵-۵- بهینه سازی تحت تغییرات تصادفی بار

در این بخش اغتشاش باری به صورت قطار پالس نامنظم به ریزش‌بکه اعمال شده و در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن تغییرات متوالی بار ضریب PID به صورت جدول ۵ بهینه سازی شده است:

در حالت اولیه ریزش‌بکه و بعد از بهینه سازی PID جدول (۵): ضریب کنترل کننده

پارامتر	مقدار اولیه	تابع هدف ITAE	تابع هدف IAE
Kp	۴۰	۳,۸۶۴۵	۱۲,۰۶۲
Ki	۹	۲۲,۰۴۳	۵,۹۵۲
Kd	۱۰	۹,۷۳۲۸	۵,۹۱
ITAE	۱,۷۴۷۲	۰,۰۰۷۲	-
IEA	۱,۷۴۷۲	-	۰,۳۴۸۵

در شکل ۱۴ بهترین تغییرات فرکانسی حاصل شده به ازای ضریب کنترل کننده PID فوق نشان داده شده است. مطابق جدول (۴-۶) مشاهده می‌شود که میزان بهبود تابع هدف در حالت ITAE نسبت به تابع هدف حالت IAE به ترتیب از ۱,۷۴۷۲ به ۰,۰۰۷۲ و ۱,۷۴۷۲ به ۰,۳۴۸۵ می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در هر تغییر پله ای بار ماکزیمم فرجهش با تابع ITAE نسبت به تابع IAE کمتر بوده است.



شکل (۱۴): مقایسه تغییرات فرکانسی حالت اولیه با حالت بهینه شده در حالت چندین تغییر در بار

نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی به صورت مناسبی تنظیم شده است. مقدار شاخص ITAE نسبت به شاخص IAE به صورت چشمگیری بهبود یافته است. کنترل کننده PID توانسته نوسانات فرکانسی ریزشکه را میرا نماید.

جدول (۵): مقایسه بهینه سازی ضرایب PID براساس الگوریتم های بهینه سازی وال و ازدحام ذرات

WOA	PSO	PID بهینه سازی ضرایب
0.34339	0.37212	ITAE تابع هدف حالت
0.0015767	0.005779	ITAE تابع هدف حالت

جدول ۵ مقایسه بهینه سازی ضرایب PID براساس الگوریتم های بهینه سازی وال و ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول نشان داده شده بهترین مقادیر بهینه برای تابع هدف IAE و ITAE توسط الگوریتم WOA نسبت به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) یافت شده است. تنظیم بهینه PID توانسته نوسانات فرکانسی ریزشکه را میرا نماید. پاسخ بدست آمده با تابع هدف ITAE در تغییرات پله های بعدی بار دارای فراجاهش بالاتری نسبت به پاسخ با تابع هدف IAE می باشد ولی در وضعیت زمان نشست این توابع هدف دارای نتایج مشابهی هستند.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله تحت سناریوهای زیر انجام و نتایج زیر به صورت جمع بندی ارائه می گردد.

- وضعیت اولیه ریزشبه با تغییر در بار تغییر در بار در ثانیه پنجم و به صورت افزایش ۱۰ درصدی اتفاق افتاده است. کل زمان شبیه سازی برای ۲۰ ثانیه اجرا شده است. شکل (۴-۵) نشان می دهد که ریز شبکه در این حالت بعد از نوسانات شدید فرکانسی به پایداری فرکانسی رسیده است. طول زمان مورد نیاز جهت میراسازی و به عبارت دیگر زمان نشست بالایی در این بخش مورد نیاز است.
- وضعیت اولیه ریزشبه با چندین تغییر در بار این وضعیت به صورت چندین تغییر در بار شبیه سازی شده است. در زمان $t=5$ s تغییر ۰,۰۲، پریونیت، در زمان $t=7$ s تغییر ۰,۰۳، پریونیت، در زمان $t=9$ s تغییر ۰,۰۶، پریونیت و در زمان $t=13$ s تغییر ۰,۰۸، پریونیت در بار لحاظ شده است. به ازای تغییرات نشان داده شده در بار پایداری فرکانسی شبکه از دست رفته است و تا زمان $t=20$ s هنوز وضعیت نوسانی دارد.
- ریزشبه بدون ذخیره سازی باتری بدون حضور ذخیره ساز باتری پایداری فرکانسی شبکه از دست رفته است. در این مطالعه بلوک باتری از شبیه سازی حذف شده که این مساله باعث از دست رفتن پایداری فرکانسی شده است. بدون حضور بلوک ذخیره ساز باتری امکان میراسازی نوسانات فرکانسی در این ریز شبکه وجود نداشته و توانی که در بازه زمانی جدا از شبکه صرف تامین توان اکتیو شبکه می گردید، بدون حضور باتری قابل تامین نبوده و همین مساله باعث ایجاد ناپایداری در فرکانس ریزشبه و فروپاشی آن گردیده است.
- بهینه سازی با الگوریتم WOA تحت تغییر بار تغییرات فرکانسی ریزشبه تحت تغییر ۱۰ درصدی بار در زمان $t=5$ s را نشان می دهد. مطابق شکل اعمال کنترل کننده PID با تنظیمات مطابق جدول فوق منجر به پایدار سازی تغییرات فرکانسی ریز شبکه شده است. مقادیر شاخص ITAE در طول فرآیند بهینه سازی از ۰,۰۲۹۶ به ۰,۰۰۶۳ کاهش یافته است. همانطور که واضح است بهینه سازی ضرائب کنترل کننده PID باعث شده تا نوسانات فرکانسی در مقایسه با حالت اولیه بهبود چشمگیری یابد.
- مقایسه تغییرات فرکانسی حالت تنظیم نشده PID با تغییرات فرکانسی بهینه سازی با تابع هدف ITAE و IAE با الگوریتم بهینه سازی WOA نشان می دهد که دو تابع هدف هم از نقطه نظر زمان نشست (۱۱,۰۴ ثانیه) و هم ماکزیمم فراجش (در زمان ۵,۵۸۵ ثانیه دارای دامنه تغییرات فرکانسی ۰,۰۴۳) تقریباً دارای وضعیت مشابهی هستند.
- بهینه سازی با الگوریتم WOA با چندین تغییر در بار در این بخش برای در نظر گرفتن تغییرات متوالی بار، بهینه سازی ضرائب PID انجام شده است. در زمان $t=5$ s تغییر ۰,۰۲، پریونیت، در زمان $t=7$ s تغییر ۰,۰۳، پریونیت، در زمان $t=9$ s تغییر ۰,۰۶، پریونیت و در زمان $t=13$ s تغییر ۰,۰۸، پریونیت در بار لحاظ شده است. مقدار شاخص ITAE و IAE نیز به صورت چشمگیری نسبت به حالت اولیه بهبود یافته است.
- بهینه سازی تحت تغییرات تصادفی بار در این بخش اغتشاش باری به صورت قطار پالس نامنظم به ریزشبه اعمال شده است. میزان بهبود تابع هدف در حالت ITAE نسبت به تابع هدف حالت IAE به ترتیب از ۱,۷۴۷۲ به ۰,۰۰۷۲ و ۱,۷۴۷۲ به ۰,۳۴۸۵ می باشد. مشاهده می شود که در هر تغییر پله ای بار ماکزیمم فراجش با تابع ITAE نسبت به تابع IAE کمتر بوده است. نتایج نشان می دهد که کنترل کننده پیشنهادی به صورت مناسبی تنظیم شده است. مقدار شاخص ITAE نسبت به شاخص IAE به صورت چشمگیری بهبود یافته است. کنترل کننده PID توانسته نوسانات فرکانسی ریزشبه را میرا نماید.
- جهت توسعه مقاله صورت گرفته در این مقاله پیشنهاد می گردد به منظور بهبود اینرسی شبکه و تغییرات فرکانسی از ترکیب و تنوع در انواع ذخیره ساز بهره جست که با ثابت های زمانی متفاوت می توانند تاثیر بهتری در تغییرات دینامیکی فرکانس داشته باشند. همچنین در زمینه نحوه چیدمان باتری ها و آرایش و ترکیب بندی آنها محل اتصال به شبکه و استراتژی های اتصال و نحوه شارژ و دشارژ بررسی بیشتری انجام گیرد. بررسی مطالعه انجام یافته با استفاده از روشهای تکاملی و هوشمند دیگر می تواند از دیگر کارهای آینده باشد. همچنین پیشنهاد می شود علاوه بر شاخص ITAE از شاخص های ISE، ITSE و IAE به عنوان توابع هدف این مساله بهره گیری شود.

مراجع

- [1] J-Y. Kim, J-H. Jeon, S-K Kim, C. Cho, J. H. Park, H-M Kim, and K-Y Nam, "Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 12, pp. 3037-3048, Dec. 2010.
- [2] D. Andor, "Energy Storage systems for wind energy integration, technology, application and benefit analysis," thesis, 2015.
- [3] Zhong, C., Zhao, H., Liu, Y., & Liu, C. (2024). Model predictive secondary frequency control of island microgrid based on two-layer moving-horizon estimation observer. *Applied Energy*, 372, 123721.
- [4] Nayak, P. C., Mishra, S., Prusty, R. C., & Panda, S. (2023). Hybrid whale optimization algorithm with simulated annealing for load frequency controller design of hybrid power system. *Soft Computing*, 1-24.
- [5] Ogar, V. N., Hussain, S. (2023). Load Frequency Control Using the Particle Swarm Optimisation Algorithm and PID Controller for Effective Monitoring of Transmission Line. *Energies*, 16(15), 5748.
- [6] Tudu, A. K., Naguru, N., Dey, S. H. N., & Paul, S. (2024). Load frequency control of an isolated microgrid using optimized model predictive control by GA. *Electrical Engineering*, 1-13.
- [7] Khalil, A. E., Boghdady, T. A., Alham, M. H., & Ibrahim, D. K. (2024). A novel multi-objective tuning formula for load frequency controllers in an isolated low-inertia microgrid incorporating PV/wind/FC/BESS. *Journal of Energy Storage*, 82, 110606.
- [8] Nayak, P. C., Prusty, U. C., Prusty, R. C., & Panda, S. (2022). Imperialist competitive algorithm optimized cascade controller for load frequency control of multi-microgrid system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-23.
- [9] Boopathi, D., Jagatheesan, K., Anand, B., Samanta, S., & Dey, N. (2023). Frequency Regulation of Interlinked Microgrid System Using Mayfly Algorithm-Based PID Controller. *Sustainability*, 15(11), 8829.
- [10] Sepehrzad, R., Nakhaeisharif, S., Al-Durra, A., Allahbakhshi, M., & Moridi, A. (2022). Islanded micro-grid frequency control based on the optimal-intelligent lyapunov algorithm considering power dynamic and communication uncertainties. *Electric Power Systems Research*, 208, 107917.
- [11] Dashtdar, M., Flah, A., Hosseinimoghadam, S. M. S., Reddy, C. R., Kotb, H., AboRas, K. M., & Bortoni, E. C. (2023). Improving the power quality of island microgrid with voltage and frequency control based on a hybrid genetic algorithm and PSO. *IEEE Access*, 10, 105352-105365.
- [12] Qu, Z., Younis, W., Wang, Y., & Georgievitch, P. M. (2024). A Multi-Source Power System's Load Frequency Control Utilizing Particle Swarm Optimization. *Energies*, 17(2), 517.
- [13] Deepa, A., Vinayagam, A., Suganthi, S. T., Kumaran, T., Veerasamy, V., Mohandas, R., & Irudayaraj, A. X. R. (2023). An optimized frequency control of green energy integrated microgrid power system using modified SSO Algorithm. *Soft Computing*, 1-24.
- [14] Khalil, A. E., Boghdady, T. A., Alham, M. H., & Ibrahim, D. K. (2023). Enhancing the conventional controllers for load frequency control of isolated microgrids using proposed multi-objective formulation via artificial rabbits optimization algorithm. *IEEE Access*, 11, 3472-3493.
- [15] R. Arora, S. Dahiya, "Dynamic Stability Enhancement of Power System using PSO Optimized Fuzzy Power System Stabilizer," 6th IEEE International Power India Conference (PIICON), 2014
- [16] H. Shayeghi and A. Ghasemi, "Improvement of Frequency Fluctuations in Microgrids Using an Optimized Fuzzy P-PID Controller by Modified Multi Objective Gravitational Search Algorithm," Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 12, No. 4, December 2016.
- [17] Seyedali Mirjalili, Andrew Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," Advances in Engineering Software 95 (2016) 51–67.

[18] Rabindra Kumar Sahu, Sidhartha Panda, Pratap Chandra Pradhan, "Design and analysis of hybrid firefly algorithm-pattern search based fuzzy PID controller for LFC of multi area power systems," *Electrical Power and Energy Systems* 69 (2015) 200–212.

Frequency control of the islanded microgrid Using Storage Devices with Help of Wall Optimization Algorithm

Hossein Nemati¹, Ph. D. Student, Behrouz Alfi², Assistant Professor, Hadi mahdavi³, Ph. D. Student, Hassani shayeghi⁴, Professor

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, ardabil Branch, Islamic Azad University, ardabil, Iran
Hosseinnemati6211@gmail.com

Beh_alfi@yahoo.com

hadi70mah@gmail.com

⁴ Department of Electrical Engineering, *University of Mohaghegh Ardabili*, ardbil, Iran
hshayeghi@gmail.com

Abstract:

Effective control of microgrid islanding requires controlling the energy storage system with other controllable microgrid resources. During island operation, the power balance between production and demand is not instantaneous. As a result, the microgrid frequency will fluctuate and may cause the system to shut down unless there is a proper mechanism to balance the power. The energy storage system responds in milliseconds. It is clear that the energy storage system must play an important role in maintaining frequency stability during islanding operation. Microgrids have been considered as a model for the future power system. They can combine multiple renewable energy sources and provide highly reliable electricity. Power electronics in distributed generation sources of microgrids can increase their ability to cope with disturbances and uncertainties. Recently, it has been shown that microgrids can improve their performance by using battery energy storage systems. The storage system acts as an energy producer for renewable sources and can compensate for short-term changes in the output power of renewable energy sources. Because storage devices can perform fast active power compensation, they can be used to improve the performance of load frequency control. The tested microgrid includes: distributed generation units of diesel generator, photovoltaic, and fuel cell with electrolyzer and wind turbine, and distributed energy storage units of flywheel and battery. In this paper, the frequency control of microgrid using storage devices is studied using the Wall optimization algorithm. The obtained results show that the objective function using the proposed controller is very desirable.

Keywords: Microgrid frequency control, Wall Optimization Algorithm, Battery Energy Storage System.

Corresponding Author: hadi mahdavi

