

مشارکت بهینه توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه در کنترل کوتاه مدت

فرکانس

مصطفی عابدینی^۱، سید محمد مدنی^۲ و امین خدابخشیان^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

abedinil986@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

madanil04@eng.ui.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

aminkh@eng.ui.ac.ir

چکیده: با افزایش نفوذ انرژی باد در سیستم‌های قدرت، مطالعات فراوانی برای بررسی تأثیر نیروگاه‌های بادی بر عملکرد سیستم قدرت انجام شده است. در این مقاله، ضمن اشاره به اصول کنترل فرکانس در نیروگاه‌های سنتی، ساختار و نحوه اتصال توربین بادی به شبکه قدرت معرفی شده و عملکرد توربین بادی پس از تغییر فرکانس سیستم، بررسی شده است. روش‌های متعددی برای مشارکت توربین بادی در کنترل کوتاه مدت فرکانس پیشنهاد شده است که در این مطالعه، ضمن اصلاح یکی از آخرین روش‌های به کار رفته در این زمینه، کوشش شده است با اعمال یک الگوریتم هوشمند، بهترین پاسخ فرکانسی ارائه شود. **واژه‌های کلیدی:** الگوریتم حرکت پرندگان، پاسخ اینرسی، توربین بادی سرعت متغیر، توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه، کنترل فرکانس.

۱- مقدمه

این مطالعه پس از معرفی ساختار توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه^۱، رفتار این توربین را پس از تغییر فرکانس سیستم، ارزیابی شده و کوشش شده است با اصلاح حلقه کنترلی ژنراتور، توربین بادی در کنترل فرکانس سهیم شود و از این طریق، رفتار فرکانس سیستم تا حد امکان بهبود بخشیده شود.

بخش دوم این مقاله، به تشریح اصول کنترل فرکانس در نیروگاه‌های متداول شبکه قدرت اختصاص دارد و نحوه کنترل فرکانس توسط گاورنرها و ژنراتورهای سنکرون را بررسی می‌کند. پس از معرفی ساختمان توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه در بخش سوم، نحوه مشارکت این واحد تولیدی در کنترل فرکانس در بخش چهارم ارزیابی شده است. در ادامه، روش جبران کامل

امکان استخراج حداکثر توان از انرژی باد به ازای سرعت‌های مختلف باد و کاهش فشار بر محور توربین، از جمله مواردی است که موجب شده است امروزه توربین‌های بادی با توان تولیدی بالا، بیشتر از نوع سرعت متغیر طراحی و استفاده شوند. از سوی دیگر در بین توربین‌های بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی دوسو تغذیه متداول‌ترین ساختار محسوب می‌شود [۱]. بر این مبنای، در

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

نام نویسنده مسئول : مصطفی عابدینی

نشانی نویسنده مسئول : ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان -

دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق

نیروگاه‌های دارای انرژی جنبشی بالا، نقش مؤثری در این زمینه ایفا خواهند کرد.

کنترل اولیه فرکانس^۴: در نیروگاه‌های سنتی همچون نیروگاه‌های حرارتی و آبی که از ژنراتور سنکرون در ساختار خود بهره می‌برند، پس از انحراف فرکانس سیستم، گاورنر وارد عمل شده و با تنظیم دریچه ورودی توربین، عدم تعادل به وجود آمده در سیستم را جبران می‌کند. باز یا بسته کردن دریچه ورودی توربین، فرآیند مکانیکی است که با چند ثانیه تأخیر انجام می‌شود. به همین علت، افزایش توان خروجی ژنراتورهای سنکرون، چند ثانیه پس از وقوع عدم تعادل توان و تشخیص افت فرکانس توسط گاورنرها انجام می‌شود. افزایش توان خروجی توربین‌ها طی این مرحله، موجب می‌شود روند افت فرکانس سیستم متوقف شده و نرخ تغییر فرکانس، مثبت شود.

کنترل ثانویه فرکانس^۵: ویژگی اکتی توربین‌ها موجب می‌شود حتی پس از جبران کامل عدم تعادل توان از طریق گاورنرها، فرکانس نهایی شبکه متفاوت با مقدار نامی باشد. در این مرحله، واحد کنترل خودکار تولید^۶ با اعمال سیگنال کنترلی مناسب به گاورنر توربین‌های مورد نظر، فرکانس شبکه را به مقدار نامی خود باز می‌گرداند.

همان‌طور که در ادامه بیان خواهد شد، اصلاح حلقه کنترلی DFIG در این مقاله، موجب بهبود رفتار فرکانس سیستم طی هر دو مرحله زمانی پاسخ اینرسی و پاسخ اولیه فرکانس، خواهد شد. به همین علت، کوشش شده است با نام‌گذاری مقاله با عنوان "مشارکت توربین بادی در کنترل کوتاه مدت فرکانس"، کل بازه زمانی که عملکرد سیستم طراحی شده بر رفتار سیستم مؤثر بوده است، پوشش داده شود. شایان ذکر است این نام‌گذاری پیش از این نیز در برخی مقالات مطرح شده است [۵-۷]. برخی مطالعات، تنها مشارکت توربین بادی در کنترل اولیه فرکانس را بررسی کرده‌اند [۸-۹] و هریک با ارایه یک روش منحصر به فرد، برای بهبود رفتار فرکانس سیستم گام برداشته‌اند.

عدم تعادل به منظور مشارکت توربین بادی در کنترل کوتاه مدت فرکانس^۲ معرفی شده است. پس از اصلاح این روش، راهکار پیشنهادی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی حرکت پرندگان ارایه شده است. در پایان، نتایج شبیه‌سازی حاصل از روش پیشنهادی با دیگر روش‌ها مقایسه و رفتار گذرای فرکانس سیستم قدرت پس از وقوع عدم تعادل ارزیابی شده است.

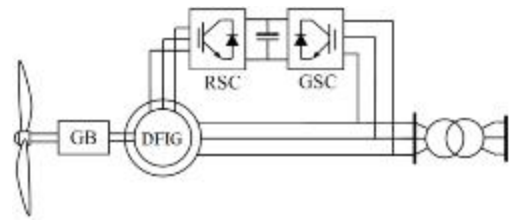
۲- اصول کنترل فرکانس در واحدهای

تولیدی متداول

فرکانس سیستم قدرت، شاخص برقراری تعادل بین میزان توان تولیدی و بار مصرفی در شبکه محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، تغییر ناگهانی بار و یا کاهش تولید، موجب می‌شود فرکانس شبکه از مقدار نامی فاصله بگیرد. در شرایط عملکرد عادی سیستم، مجموع توان تولیدی در شبکه برابر با کل بار مصرفی آن بوده و فرکانس سیستم کمابیش برابر فرکانس نامی ۵۰ هرتز خواهد بود [۲]؛ اما به دنبال افزایش ناگهانی بار الکتریکی (یا خروج غیر منتظره یک واحد تولیدی)، ژنراتورهای سنکرون و بارهای حساس به فرکانس با آزاد کردن بخشی از انرژی جنبشی خود، اضافه بار را در لحظات ابتدایی جبران می‌کنند. از طرفی، آزاد شدن انرژی جنبشی ژنراتورها به کاهش سرعت روتور و به دنبال آن به افت فرکانس سیستم قدرت منجر می‌شود [۳-۴]. پس از افت فرکانس، گاورنرها وارد عمل شده و با افزایش توان خروجی ژنراتورهای سنکرون، کوشش در جبران بار وارد شده دارند. با توجه به موارد یاد شده، فرآیند کنترل فرکانس و جبران عدم تعادل توان به مراحل زمانی زیر تقسیم می‌شود.

پاسخ اینرسی^۳: بلافاصله پس از انحراف فرکانس، ژنراتورهای سنکرون متصل به شبکه با تزریق بخشی از انرژی جنبشی موجود در جرم چرخان خود، مانع از افت شدید فرکانس در لحظات ابتدایی می‌شوند. بدیهی است

۳- ساختمان ژنراتور القایی دوسوتغذیه



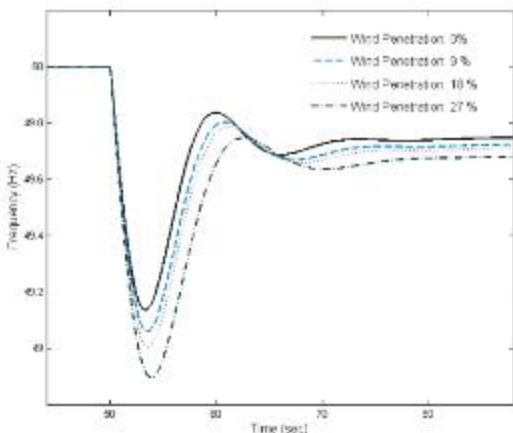
شکل (۱): ساختار و نحوه اتصال ژنراتور القایی دوسوتغذیه به شبکه قدرت

شکل (۱) ساختار کلی و نحوه اتصال یک ژنراتور القایی دوسوتغذیه به سیستم قدرت را نمایش می‌دهد. درحالی‌که استاتور به طور مستقیم به شبکه متصل شده است، روتور از طریق حلقه‌های لغزان به مبدل الکترونیک قدرت سه‌فاز متصل می‌شود. مبدل الکترونیک قدرت مورد استفاده در این ساختار تنها حدود ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور را از خود عبور می‌دهد و به همین علت، تلفات الکتریکی این توربین در مقایسه با ساختارهای با مبدل ظرفیت کامل بسیار کمتر بوده و هزینه احداث آن نیز کاهش می‌یابد. بر اساس شکل (۱)، این مبدل از دو واحد کنترلی مستقل تشکیل شده است که مبدل سمت روتور، کنترل توان اکتیو و کنترل سرعت روتور را به عهده دارد. مبدل سمت شبکه، ضمن تثبیت ولتاژ لینک DC، قادر به کنترل توان راکتیو عبوری نیز می‌باشد. در این پژوهش، از تشریح جزئیات و نحوه طراحی کنترل‌کننده‌های مورد استفاده در این مبدل صرف نظر شده و علاقه‌مندان به مطالعه مراجع [۱۰-۱۲] دعوت می‌شوند.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، توربین بادی مورد مطالعه در این مقاله، از نوع توربین بادی سرعت متغیر است و طراحی آن به گونه‌ای انجام می‌شود که به ازای سرعت‌های مختلف وزش باد، همواره حداکثر توان ممکن توسط توربین استخراج شود. در این راستا لازم است ضمن لحاظ نمودن محدودیت‌های فیزیکی توربین و ژنراتور، سرعت چرخش روتور به طور پیوسته متناسب با سرعت وزش باد تنظیم شود؛ شرایط عملکرد یاد شده را شرایط استخراج حداکثر توان^۷ می‌نامند.

۴- مشارکت توربین بادی مبتنی بر DFIG در کنترل کوتاه‌مدت فرکانس

همان‌طور که پیش از این بیان شد، بلافاصله پس از وقوع عدم تعادل توان، ژنراتورهای سنکرون با آزاد کردن بخشی از انرژی جنبشی خود، کوشش در جبران عدم تعادل دارند؛ اما وجود مبدل‌های الکترونیک قدرت و خازن لینک DC در ساختار توربین‌های بادی سرعت متغیر، باعث می‌شود ارتباط بین سرعت ژنراتور و فرکانس شبکه قطع شود؛ به همین علت تغییرات فرکانس شبکه در روتور ژنراتور القایی رویت نشده و ژنراتور القایی هیچ واکنشی نسبت به تغییر فرکانس نشان نمی‌دهد. بنابراین، بر اساس شکل (۲) با افزایش نفوذ نیروگاه بادی سرعت متغیر در سیستم قدرت، اینرسی موثر^۸ سیستم کاهش یافته و نرخ تغییر فرکانس افزایش خواهد یافت [۵]. به عبارت دیگر، نفوذ منابع انرژی باد و جایگزین شدن آن‌ها به جای ژنراتورهای سنکرون در شبکه، موجب تضعیف رفتار فرکانسی سیستم شده و می‌تواند حتی به ناپایداری فرکانسی منجر شود [۱۳].

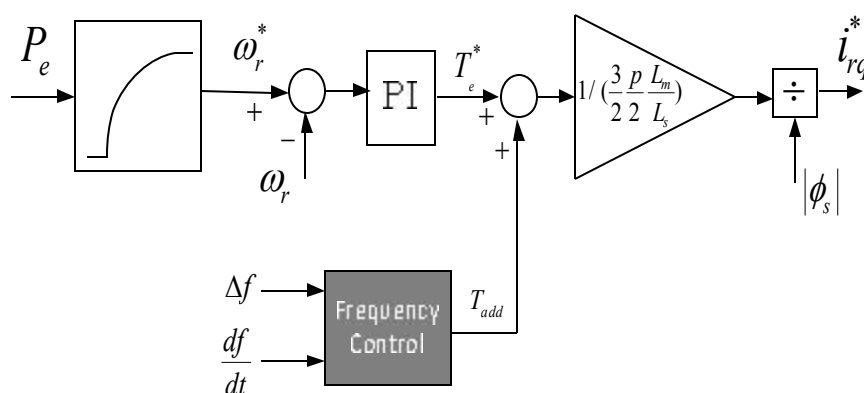


شکل (۲): تغییر فرکانس میانگین سیستم قدرت بر مبنای میزان نفوذ انرژی باد [V]

مشارکت یک واحد تولیدی در کنترل فرکانس شبکه، منوط به تغییر توان اکتیو خروجی آن پس از انحراف فرکانسی است. بر این اساس، برای مشارکت توربین بادی در کنترل فرکانس، نحوه کنترل توان اکتیو (گشتاور خروجی) در ژنراتور القایی دوسوتغذیه مطابق شکل (۳)

سیگنال T_{add} که وظیفه کنترل فرکانس را به عهده دارد به سیگنال گشتاور مرجع T_e^* که در شرایط عادی بر اساس منحنی سرعت-توان بهینه (به منظور استخراج حداکثر توان) تعیین شده است، اضافه می‌شود. تفاوت روش‌های ارائه شده در مقالات، در مورد نحوه ساخت و اعمال گشتاور کنترلی T_{add} است.

اصلاح شده و ساختار کنترلی زیر در مقالات پیشنهاد شده است [۱۴، ۱۵، ۶]. در واقع بلافاصله پس از وقوع عدم تعادل توان و قبل از آن که گاورنرها بتوانند توان خروجی ژنراتورهای سنکرون را افزایش دهند، حلقه کنترل سرعت در ساختمان DFIG را به طور موقت غیرفعال نموده و در عوض از طریق حلقه کنترل فرکانس، با تغییر توان خروجی ژنراتور القایی، عدم تعادل توان را جبران می‌کنیم.

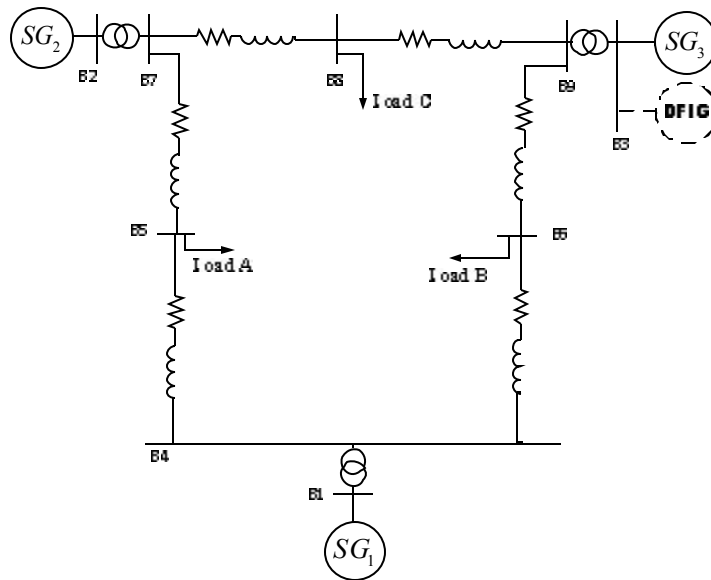


شکل (۳): حلقه اصلاح شده کنترل توان اکتیو DFIG به منظور مشارکت آن در کنترل فرکانس

۴-۱- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، برای ارزیابی روش پیشنهادی، از سیستم استاندارد سه ماشین ۹ باس که در شکل (۴) ترسیم شده است [۱۷]، استفاده می‌شود. این سیستم شامل یک نیروگاه آبی با ظرفیت ۲۴۷/۵ مگاوات و دو واحد بخار به ظرفیت نامی ۱۹۲ و ۱۲۵ مگاوات است. ویژگی‌های کامل ژنراتورها و خطوط انتقال، در ضمیمه مقاله درج شده است. مدل‌سازی ژنراتورهای سنکرون و دیگر اجزای سیستم قدرت، طبق مدل‌های دقیق کتاب اندرسون [۱۷] انجام شده است. علاقه‌مندان می‌توانند برای مشاهده جزئیات بیشتر در مورد نحوه مدل‌سازی اجزای قدرت به مراجع معتبر مراجعه کنند [۳، ۴ و ۱۰]. نیروگاه بادی مورد استفاده در این مطالعه، در واقع یک مزرعه بادی متشکل از ۷۵ توربین بادی ۲ مگاوات مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه است. با یکسان فرض کردن شرایط باد و ویژگی‌های تمامی توربین‌های بادی، مزرعه بادی یاد شده را به شکل یک توربین بادی متمرکز با ظرفیت نامی ۱۵۰ مگاوات در نظر خواهیم گرفت.

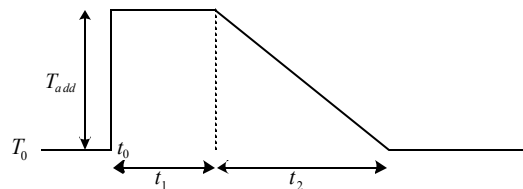
شایان ذکر است افزایش توان خروجی DFIG در این روش، منوط به آزاد شدن بخشی از انرژی جنبشی توربین-ژنراتور است و با توجه به محدودیت انرژی جنبشی موجود در جرم توربین، تنها در چند ثانیه ابتدایی پس از اغتشاش، امکان جبران عدم تعادل از این طریق وجود دارد. پیش از این برای مشارکت توربین بادی در بهبود پاسخ اینرسی توربین، روش‌های کنترل فرکانس بر مبنای Δf و df/dt ارائه شده است که جزئیات و نتایج این روش‌های کنترلی در مراجع [۱۴ و ۱۶] بحث شده است. در این قسمت، ابتدا سیستم مورد مطالعه در این مقاله معرفی می‌شود. در ادامه، ضمن معرفی روش جبران کامل عدم تعادل به عنوان جدیدترین روش پیشنهادی در این زمینه، مزایا و معایب این روش کنترلی شمرده می‌شود. پس از اصلاح روش جبران کامل عدم تعادل، راهکار پیشنهادی معرفی شده و ضمن ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، کارایی روش پیشنهادی بررسی خواهد شد.



شکل (۴): سیستم استاندارد سه ماشین ۹ باس [۱۷]

تغییرات سرعت وزش باد و تأثیر آن بر توان خروجی توربین بادی، از جمله مواردی است که در مقالات مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد؛ با وجود این، چون تمرکز این مقاله، بر رفتار کوتاه مدت فرکانس و نحوه تزریق انرژی جنبشی توربین به شبکه (در بازه‌های زمانی کمتر از ۳۰ ثانیه) بوده است، عدم قطعیت^۹ باد در این مطالعه مطرح نمی‌شود. در مقالات مشابهی که موضوع مشارکت توربین بادی در کنترل اولیه فرکانس را مد نظر قرار می‌دهند، نیز سرعت باد ثابت فرض می‌شود [۱۸-۲۰]؛ این در حالی است که بحث مدل‌سازی عدم قطعیت باد و تأثیر آن بر رفتار دیگر شاخص‌های شبکه، بیشتر در مطالعات بلند مدت مطرح می‌شود [۲۱-۲۳].

کنترل فرکانس از طریق جبران کامل عدم تعادل:



شکل (۵): نحوه تزریق گشتاور کنترلی DFIG در مرجع

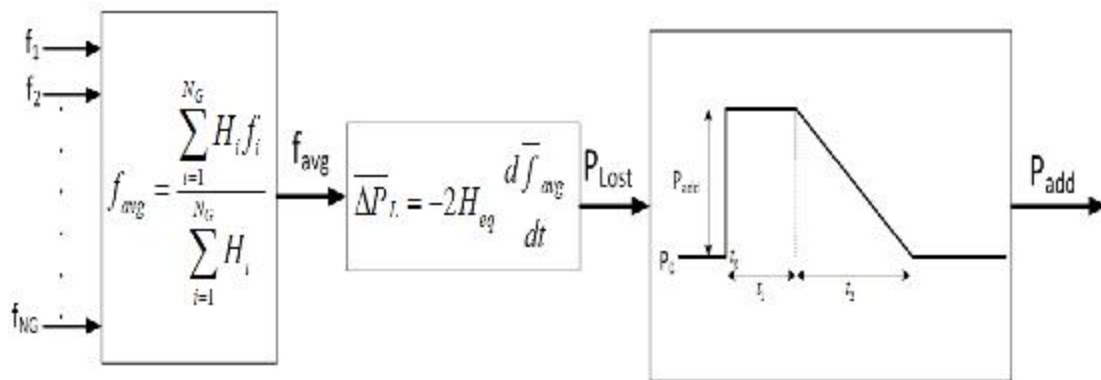
[۲۴]

مرجع [۲۴] پیشنهاد می‌کند پس از بروز عدم تعادل در زمان t_0 ، گشتاور کنترلی T_{add} را مطابق شکل (۵) به حلقه کنترل فرکانس DFIG اعمال کنیم. قابلیت کنترل سریع توان خروجی در ژنراتور القایی دوسوتغذیه، اجازه می‌دهد بلافاصله پس از افت فرکانس، گشتاور خروجی توربین بادی را به شکل پل‌های به مقدار T_{add} افزایش دهیم. از طرفی، با توجه به محدودیت انرژی جنبشی توربین و به منظور جلوگیری از توقف ناگهانی حلقه کنترل فرکانس، لازم است پس از t_1 ثانیه گشتاور اعمال شده را به تدریج کاهش دهیم تا در نهایت به صفر برسد. اکنون، مسأله اصلی تعیین مقادیر مناسب t_1 ، t_2 و T_{add} خواهد بود. در مرجع یاد شده، مقدار T_{add} برابر ۲۰ درصد گشتاور نامی فرض شده است و برای آن که فرصت کافی در اختیار گاورنرها قرار گیرد، بازه زمانی t_2 حداقل برابر ۱۰ ثانیه لحاظ شده است. مرجع [۲۵] روش کنترلی یاد شده را تکمیل نموده و پس از تخمین عدم تعادل به وجود آمده در سیستم، در ثانیه‌های ابتدایی پس از وقوع اغتشاش، عدم تعادل توان را به طور کامل توسط DFIG جبران می‌سازد. پس از t_1 ثانیه، گشتاور اعمالی را مطابق شکل (۵) به طور تدریجی به

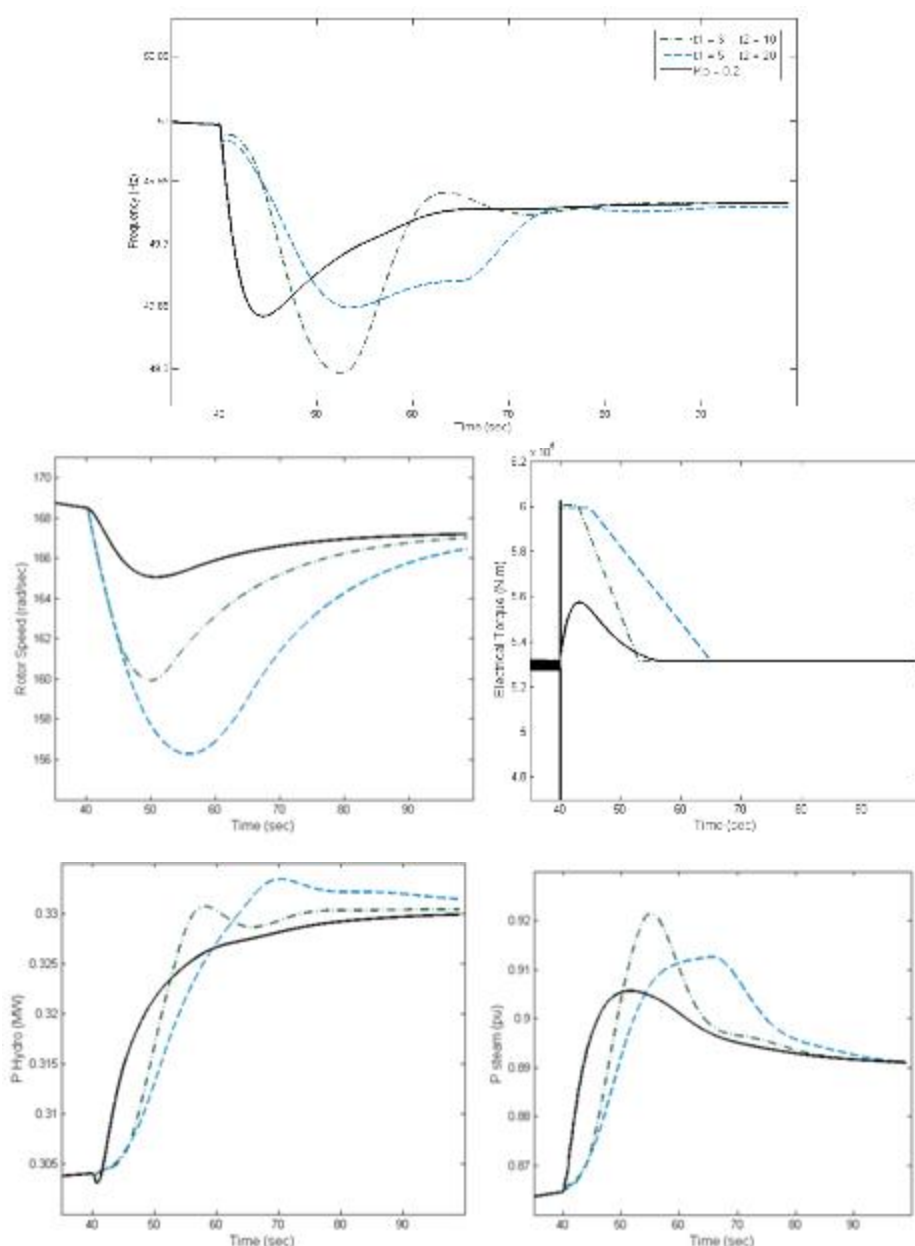
گاورنرها تا قبل از کاهش P_{add} و افت فرکانس، عدم تعادل توان را احساس نکرده و هیچ فرمانی به دریچه توربین‌های خود صادر نمی‌کنند. بنابراین، همان‌طور که مشاهده می‌شود تا چند ثانیه پس از بروز اغتشاش، تغییر چندانی در توان تولیدی ژنراتورهای سنکرون مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، در t_1 ثانیه پس از اغتشاش، گاورنرها هنوز تحریک نشده‌اند و هیچ عمل کنترلی برای جبران عدم تعادل از طرف نیروگاه‌ها انجام نشده است؛ این پدیده را "تنبل شدن گاورنر" می‌نامیم.

شاخص‌های t_1 ، t_2 و P_{add} که نقش مؤثری در نحوه مشارکت توربین در کنترل فرکانس ایفا می‌کنند، بیشتر به روش سعی و خطا انتخاب شده‌اند و تا کنون روش جامع و منظمی در این زمینه ارائه نشده است. در این مقاله، مقدار گشتاور بهینه P_{add} را به روش PSO به دست آورده و در نهایت، نتایج روش پیشنهادی خود را با دیگر روش‌ها مقایسه می‌کنیم.

صفر کاهش می‌دهیم. چگونگی تخمین عدم تعادل توان به طور کامل در [۲۵] تشریح شده است و در شکل (۶) به طور خلاصه نمایش داده شده است. در این روش پس از تخمین میزان عدم تعادل توان P_{Lost} بر مبنای سیگنال فرکانس میانگین، توان اکتیو خروجی DFIG را به مدت t_1 ثانیه به مقدار P_{Lost} افزایش می‌دهیم تا از این طریق، عدم تعادل توان به طور کامل جبران شود. سپس طی t_2 ثانیه، توان اضافی P_{add} را به طور خطی به صفر کاهش می‌دهیم. پاسخ فرکانسی سیستم قدرت پس از اعمال روش کنترلی شکل (۶) به ازای دو مجموعه متفاوت t_1 ، t_2 با فرض آن‌که در ابتدا $P_{add}=P_{Lost}$ در شکل (۷) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جبران کامل عدم تعادل توسط DFIG موجب می‌شود در t_1 ثانیه ابتدایی پس از اغتشاش، فرکانس کمابیش ثابت بماند و پس از کاهش یافتن P_{add} افت فرکانس آغاز شود. اگرچه تثبیت فرکانس در لحظات ابتدایی مطلوب به نظر می‌رسد، ولی این روش کنترلی مشکلاتی نیز به همراه خواهد داشت.



شکل (۶): بلوک دیاگرام روش جبران کامل عدم تعادل



شکل (۷): روش جبران کامل عدم تعادل از طریق ژنراتور القایی دوسو تغذیه: تغییرات فرکانس میانگین، گشتاور الکتریکی و سرعت روتور DFIG همراه با توان خروجی نیروگاه‌های آبی و حرارتی، به ازای تغییر ناگهانی بار به میزان $\Delta P_L=0.1(\text{pu})$

توربین برخلاف جهت مطلوب خواهد بود [۴]. این رفتار نامطلوب توربین آبی در لحظات ابتدایی پس از اغتشاش، به وضوح در منحنی توان خروجی توربین آبی در شکل (۷) قبل از به کار گیری روش پیشنهادی، قابل مشاهده است؛ به عبارت دیگر، تابع تبدیل توربین آبی غیر مینیمم فاز است و به همین علت، در لحظات ابتدایی پس از بروز عدم تعادل، تغییرات توان خروجی توربین آبی،

ارزیابی رفتار نیروگاه‌های آبی و توربین بادی مبتنی بر DFIG پس از بروز عدم تعادل توان:

در این قسمت، به اختصار مطالبی در مورد نقش توربین‌های آبی و بادی در تغییرات گذرای فرکانس سیستم بیان می‌شود. همان‌گونه که می‌دانیم ویژگی فیزیکی توربین آبی به نحوی است که پس از صدور فرمان گاورنر به دریچه توربین در لحظات ابتدایی، تغییر توان خروجی

پیچیده و جدید احساس نکرده و از یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های موجود را انتخاب کرده‌اند. بدیهی است استفاده از دیگر الگوریتم‌ها و مقایسه نتایج هریک با دیگر روش‌های بهینه‌سازی، می‌تواند مکمل موضوع پیشنهاد شده در این مطالعه باشد. در هر حال هدف از این پژوهش، بهبود رفتار گذرای فرکانس و ارزیابی دقیق سیستم قدرت بوده است و بررسی جزئیات الگوریتم و یا مقایسه بین انواع الگوریتم‌ها مد نظر نبوده است. بنابراین، در ادامه، الگوریتم حرکت پرندگان (PSO) به طور مختصر معرفی شده و پس از تعریف تابع هدف مناسب، نتایج شبیه‌سازی ارزیابی شده است.

۵- روش پیشنهادی

در قسمت قبل دیدیم چنانچه در روش کنترلی بر مبنای t_1 و t_2 توربین بادی عدم تعادل را به طور کامل جبران کند، در لحظات ابتدایی افت فرکانسی مشاهده نخواهد شد و به همین علت گاورنرها به عدم تعادل واکنش نشان نمی‌دهند. از طرفی شکل (۷) نشان می‌دهد به ازای مقادیر مختلف t_1 و t_2 رفتار فرکانسی سیستم متفاوت خواهد بود. بنابراین، جبران کامل عدم تعادل، لزوماً بهترین انتخاب نخواهد بود و بر این اساس، در این قسمت با استفاده از یک الگوریتم هوشمند، مقادیر بهینه سه شاخص t_1 ، t_2 ، P_{add} را به گونه‌های جستجو می‌کنیم که حداکثر افت فرکانس و نیز حداکثر نرخ تغییر فرکانس را تا حد امکان کاهش دهیم و از این طریق بتوانیم رفتار فرکانسی سیستم قدرت را به بهترین نحو کنترل نماییم.

در این شبیه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی حرکت پرندگان^{۱۱} PSO استفاده شده است که شاید بتوان آن را یکی از نخستین و ساده‌ترین الگوریتم‌ها دانست. نظر به اینکه، تا کنون هیچ‌گاه روش‌های بهینه‌سازی برای بهبود روش یاد شده استفاده نشده است و این مطالعه برای نخستین بار این موضوع را مطرح ساخته است، نویسندگان این مقاله نیازی به بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند

۵-۱- معرفی الگوریتم بهینه‌سازی حرکت

پرندگان PSO:

توده‌ای از حشرات یا پرندگان را در نظر بگیرید که در جستجوی غذا در حرکت هستند. هریک از پرندگان را به شکل یک ذره^{۱۱} در فضای چند بعدی با موقعیت و سرعت مشخص مدل می‌کنیم. هر پرنده بهترین موقعیت خود از حیث غذا (تابع هدف^{۱۲}) که تا کنون در آن قرار داشته است را به خاطر می‌سپارد و آن را به دیگر پرندگان نیز اطلاع می‌دهد، ضمن آن‌که از بهترین موقعیتی که دیگر پرندگان تا کنون تجربه کرده‌اند نیز مطلع می‌شود. بنابراین، هر ذره با توجه به موارد یاد شده، سرعت و موقعیت خود در گام بعدی را به نحوی اصلاح می‌کند تا به هدف نزدیکتر شود. فرض کنید تعداد کل ذرات برابر p باشد که آن را جمعیت^{۱۳} می‌نامیم. موقعیت و سرعت ذره i در تکرار^{۱۴} j ام با $X(i,j)$ و $V(i,j)$ نمایش داده می‌شود. وضعیت هر ذره با توجه به تابع هدفی که قبلاً توسط کاربر تعیین شده است، سنجیده می‌شود و هرچه مقدار تابع هدف در موقعیت مورد نظر کوچکتر باشد، آن وضعیت مناسبتر محسوب می‌شود. بهترین موقعیتی که ذره i تا کنون در آن قرار گرفته است را $X_{pbest}(i)$ و بهترین موقعیتی که در بین

از دو شاخص یاد شده به ترتیب توسط ضرایب مثبت α و β مشخص شده است ($\alpha+\beta=1$). از طرفی با توجه به محدودیت انرژی جنبشی توربین، لازم است تدابیر لازم اندیشیده شود تا سرعت روتور از حداقل مجاز (معادل ۰/۷ پریونیت) تجاوز نکند.

شایان ذکر است استفاده حداکثر از انرژی جنبشی توربین باد طی فرآیند کنترل فرکانس، در شرایطی رخ می دهد که در اثر افزایش توان خروجی DFIG، سرعت روتور به مقدار ۰/۷ پریونیت برسد. بنابراین، حداکثر انرژی جنبشی در دسترس توربین بادی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta E_{\max} = H_{DFIG} [\omega_r^2 - (0.7\omega_{base})^2] \quad (4)$$

که در آن، ω_r سرعت روتور قبل از وقوع عدم تعادل توان است. مقدار انرژی که از طریق مشارکت DFIG در کنترل کوتاه مدت فرکانس به شبکه تزریق می شود با محاسبه سطح زیر منحنی P_{add} بر حسب زمان قابل دستیابی است که با توجه به شکل (۶) در روش کنترلی مورد نظر، این مقدار عبارت است از:

$$E_{inject} = P_{add} (t_1 + \frac{t_2}{2}) \quad (5)$$

بنابراین، قید زیر نیز در الگوریتم PSO گنجانده می شود:

$$P_{add} (t_1 + \frac{t_2}{2}) < H_{DFIG} [\omega_r^2 - (0.7\omega_{base})^2] \quad (6)$$

با توجه به اهمیت شاخص حداکثر انحراف فرکانس، در این مطالعه ضرایب تابع هدف را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\begin{cases} \alpha = 0.8 \\ \beta = 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

الگوریتم را به ازای سه ذره و از موقعیت های ابتدایی زیر آغاز نموده و تا ۵ تکرار ادامه می دهیم:

$$\begin{cases} X(1,1) = [0, 1, 9] \\ X(2,1) = [0.4, 10, 16] \\ X(3,1) = [1, 5, 15] \end{cases} \quad (8)$$

برای مثال طبق سطر دوم رابطه بالا، موقعیت ابتدایی

تمامی ذرات مشاهده شده است را Xg_{best} می نامیم.

بر این اساس، موقعیت و سرعت ذره i در تکرار بعدی طبق رابطه بازگشتی ۱ تعیین می شود.

$$\begin{cases} V(i, j+1) = rand * (Xg_{best} - X(i, j)) \\ + w * V(i, j) + rand * (Xp_{best}(i) - X(i, j)) \\ X(i, j+1) = X(i, j) + V(i, j+1) \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه اخیر، $rand$ یک عدد تصادفی بین $[0,1]$ بوده و w ضریبی است که به منظور کنترل سرعت ذرات استفاده می شود.

۵-۲- نحوه پیاده سازی الگوریتم PSO در

روش پیشنهادی:

در این مسأله، هدف یافتن مقادیر بهینه شاخص های P_{add} ، t_1 و t_2 است به نحوی که بهترین پاسخ فرکانسی را شاهد باشیم. بنابراین، هر ذره در الگوریتم PSO را می توان مجموع های شامل سه ویژگی P_{add} ، t_1 و t_2 دانست که به شکل بردار موقعیت $X = (P_{add}, t_1, t_2)$ نمایش داده می شود.

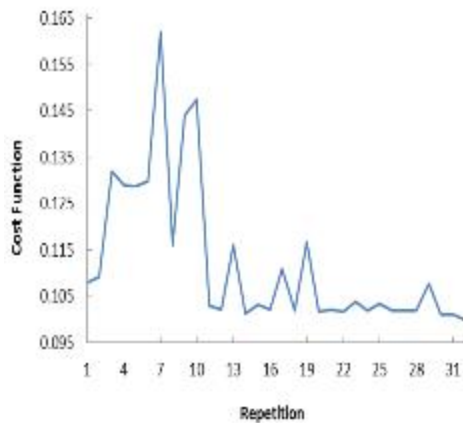
در این مطالعه، دو شاخص حداکثر انحراف فرکانس و متوسط اندازه انحراف فرکانس را به عنوان معیار سنجش رفتار فرکانس در نظر می گیریم و بر این مبنا، تابع هدف را به شکل زیر تعریف می کنیم:

$$Error = \alpha |\Delta f_{\max}| + \beta (\Delta f_{rms}) \quad (2)$$

در رابطه اخیر، Δf_{\max} حداکثر انحراف فرکانس نسبت به فرکانس نامی شبکه (۵۰ هرتز) بوده و Δf_{rms} متوسط انحراف فرکانس به شکل "مجدور میانگین مربعات خطای فرکانس نسبت به فرکانس نامی شبکه طی T ثانیه ابتدایی پس از اغتشاش" تعریف شده است:

$$\Delta f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (f - 50)^2 dt} \quad (3)$$

تابع هدف (تابع هزینه) نرمالیزه شده و اهمیت هر یک



شکل (۹): تغییرات تابع هدف طی الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای بار دوم

پاسخ بهینه الگوریتم پس از ۳۲ مرتبه اجرای شبیه‌سازی به شرح زیر خواهد بود:

$$X_{gbest} = X(2,16) = [0.7394, 15.16, 55.94] \quad (11)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_{add} = 0.7394P_{Lost} \\ t_1 = 15.16 \\ t_2 = 55.94 \end{cases}$$

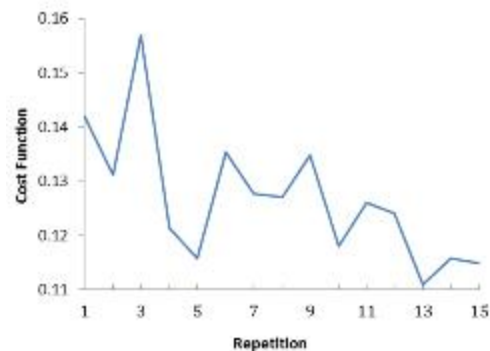
در شکل (۱۰) فرکانس میانگین سیستم قدرت به ازای وقوع عدم تعادل توان به میزان ۰/۱ پرونیست و پس از مشارکت DFIG به روش‌های سعی و خطا و نیز الگوریتم پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شده است. نکته قابل تأمل اینجاست که جبران کامل عدم تعادل در لحظات ابتدایی (خط ممتد در شکل (۱۰)) نتوانسته است بهترین پاسخ فرکانسی را به دنبال داشته باشد؛ بلکه نتایج بهینه‌سازی گویای آن است که تنها با جبران ۷۴ درصد توان از طریق DFIG می‌توان رفتار فرکانسی بهتری را مشاهده کرد. در پایان روش کنترلی بالا و با صفر شدن P_{add} حلقه کنترل سرعت ژنراتور القایی دوسو تغذیه فعال شده و سرعت روتور به مقدار قبلی باز می‌شود. به همین علت پس از جبران اولیه فرکانس، انحراف فرکانس دیگری رخ داده است که از مرحله شارژ روتور (بازگرداندن سرعت روتور به سرعت اولیه آن قبل از وقوع اغتشاش) ناشی می‌شود.

ذره دوم این‌گونه تعریف شده است: $P_{add} = 0.4P_{Lost}$. پس از پایان الگوریتم، مقادیر بهینه زیر برای طراحی کنترل کننده پیشنهاد شده است:

$$X_{gbest} = X(1,5) = [0.776, 13.38, 30.41] \quad (9)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_{add} = 0.776P_{Lost} \\ t_1 = 13.38 \\ t_2 = 30.41 \end{cases}$$

در شکل (۸) مقدار تابع هدف در هر تکرار از الگوریتم PSO مشخص شده است؛ در این شکل، روند کاهش تابع هدف طی الگوریتم به وضوح قابل مشاهده است. با توجه به جمعیت و تکرار مورد نظر در این حالت، شبیه‌سازی سیستم در مجموع ۱۵ بار تکرار خواهد شد.

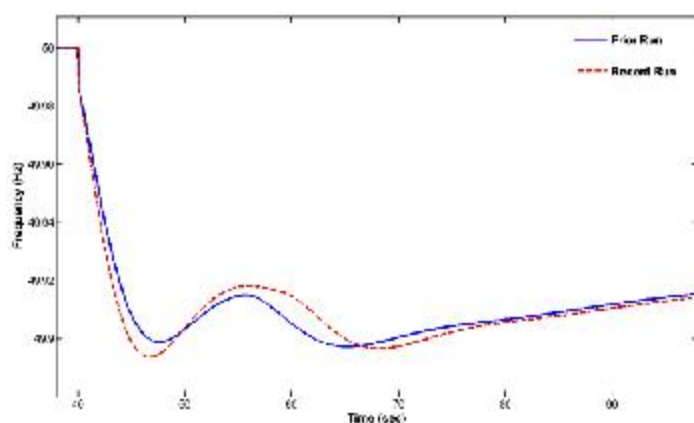


شکل (۸): تغییرات تابع هدف طی الگوریتم بهینه‌سازی PSO

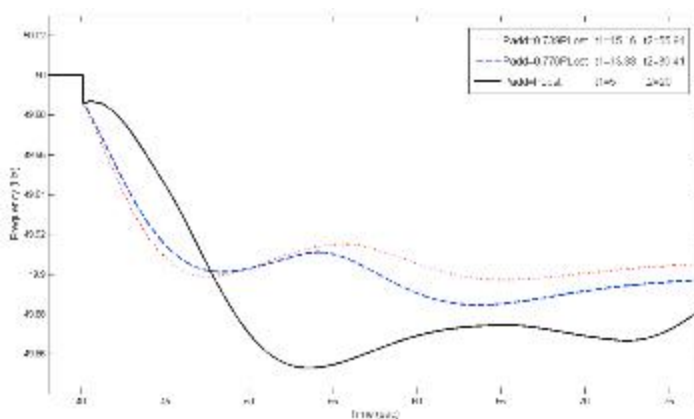
در ادامه، به منظور دستیابی به نتایج بهتر، الگوریتم بالا را به ازای ۲ ذره و تا ۱۶ تکرار مجدداً انجام می‌دهیم. با این تفاوت که این بار، موقعیت اولیه ذرات را نزدیک به مقدار بهینه حاصل از الگوریتم قبلی تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} X(1,1) = [0.776, 13.5, 30] \\ X(2,1) = [0.8073, 18, 40] \end{cases} \quad (10)$$

تغییرات مقدار تابع هدف طی الگوریتم PSO در شکل (۹) ترسیم شده است. تغییرات اندک مقدار تابع هدف، در تکرارهای پایانی گویای آن است که الگوریتم مورد نظر به خوبی به پاسخ بهینه نزدیک شده است.



شکل (۱۱): مقایسه فرکانس سیستم بر مبنای پاسخ بهینه حاصل از الگوریتم PSO به ازای دو تابع هدف متفاوت



شکل (۱۰): تغییرات فرکانس میانگین در روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش جبران کامل عدم تعادل

است)، انحراف فرکانس بیشتری در پاسخ بهینه جدید مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان با تغییر ضرایب وزنی تابع هدف، و با توجه به قواعد شبکه قدرت مورد مطالعه، هریک از شاخص‌های انحراف فرکانس، نرخ تغییرات فرکانس و یا دیگر شاخص‌های مورد نظر بهره‌بردار را بر اساس اولویت تنظیم کرد و به پاسخ فرکانسی مورد نظر دست یافت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کوشش شد پس از بیان اصول کنترل فرکانس، نحوه مشارکت ژنراتورهای سنکرون و نیز توربین بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در کنترل فرکانس شبکه قدرت، ارزیابی شود. همان‌طور که مشاهده شد با وجود آن‌که انرژی جنبشی توربین بادی در مقایسه با نیروگاه آبی کمتر است، اما پاسخ سریع‌تر آن موجب می‌شود بتوان با اصلاح حلقه کنترل توان اکتیو DFIG،

۳-۵- تأثیر انتخاب ضرایب متفاوت در تعیین تابع هدف:

در این قسمت به این پرسش پاسخ داده خواهد شد که انتخاب ضرایب وزنی متفاوت α و β در تعریف تابع هدف، چگونه می‌تواند بر روند الگوریتم PSO و تعیین پاسخ بهینه اثرگذار باشد؟ در همین راستا، بار دیگر الگوریتم PSO را به ازای ضرایب وزنی زیر تکرار می‌کنیم:

$$\begin{cases} \alpha = 0.2 \\ \beta = 0.8 \end{cases} \quad (12)$$

شایان ذکر است به جز ضرایب وزنی، دیگر شاخص‌ها و ویژگی‌های جمعیت اولیه در این مسأله، مشابه شرایط الگوریتم قبلی انتخاب شده است. در شکل (۱۱) رفتار فرکانسی سیستم قدرت پس از مشارکت توربین بادی در کنترل فرکانس، به ازای دو مجموعه ضرایب وزنی متفاوت ترسیم شده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت با کاهش ضریب وزنی مربوط به حداکثر انحراف فرکانس (α) در مقایسه با اجرای قبل (مقدار α از ۰/۸ به ۰/۲ کاهش یافته

مشارکت توربین بادی در کنترل فرکانس سیستم، و نیز نحوه تزریق انرژی جنبشی آن به شبکه، از طریق الگوریتم PSO انجام می‌شود. شایان ذکر است با توجه به ماهیت الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر تکرار (مانند PSO)، نمی‌توان مقاوم بودن کنترلر پیشنهادی را در شرایط مختلف بهره برداری سیستم (به ازای نقاط کار مختلف سیستم یا با فرض وقوع عدم تعادل متفاوت از قبل) تضمین کرد.

از آنجا که سیستم مورد مطالعه، یک سیستم استاندارد ۹ باس است، چالش‌هایی همچون محدودیت انتقال توان، و پایداری دینامیکی که در طراحی سیستم‌های بزرگ - مقیاس عملی مطرح می‌شود، در این مطالعه مد نظر قرار نگرفت؛ بدیهی است پس از آنکه از صحت عملکرد روش پیشنهادی در این سیستم استاندارد مقیاس - کوچک اطمینان حاصل شد، می‌توان کارایی این روش را در سیستم‌های عملی و تحت قیود واقعی شبکه انتقال، نیز ارزیابی کرد.

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی گویای آن است که با تکیه بر این روش بهینه‌سازی، و با توجه به معیارهای بهره بردار سیستم، می‌توان حداکثر مقدار انحراف فرکانس و نیز نرخ تغییرات فرکانس را تا حد قابل قبولی کنترل کرد.

انرژی جنبشی توربین بادی را بلافاصله به شبکه تزریق کرد و از این طریق رفتار فرکانس سیستم را در لحظات ابتدایی پس از اغتشاش بهبود بخشید.

پس از ارزیابی روش جبران کامل عدم تعادل توان، که پیش از این در برخی مطالعات معرفی شده بود، متوجه شدیم که این روش کنترلی، با جبران کامل اغتشاش در لحظات ابتدایی، مانع از افت فرکانس سیستم می‌شود و به همین علت، گاورنر ژنراتورهای سنکرون در ثانیه‌های ابتدایی پس از وقوع اغتشاش، نسبت به آن بی تفاوت خواهند بود. از سوی دیگر، جبران عدم تعادل توان به واسطه آزاد شدن انرژی جنبشی توربین بادی انجام شده است که محدودیت این انرژی، موجب می‌شود تنها پس از چند ثانیه شاهد افت فرکانس سیستم باشیم. این در حالی است که مشارکت توربین بادی در این روش، تنها موجب تنبیل شدن گاورنرها شده است؛ به عبارت دیگر تنها چند ثانیه پس از بروز اغتشاش، احتمالاً شاهد افت فرکانس شدیدتری خواهیم بود. برای حل این مشکل، کوشش بخشی از عدم تعادل توان را از طریق DFIG جبران کرد تا علاوه بر مشارکت توربین بادی در کنترل کوتاه مدت فرکانس، مانع از تنبیل شدن گاورنرها شد. تعیین میزان

ضمیمه: مشخصات سیستم ۳ ماشین ۹ باس

جدول (۱): مشخصات ژنراتورهای سنکرون

واحد تولیدی	SG1	SG2	SG3
نوع واحد	آبی	بخار	بخار
P_{base} (MW)	247.5	192	125
V_{L-L} (Kv)	18	18	15.5
Pole Pairs	20	1	1
x_d (pu)	0.146	0.8958	1.312
x'_d (pu)	0.0608	0.1198	0.181
x_q (pu)	0.0969	0.8645	1.257
x'_q (pu)	0.0453	0.1969	0.25
τ'_{d0} (sec)	8.96	6	0.89
τ'_{q0} (sec)	0	0.535	0.6
x'_{fs} (pu)	0.0336	0.0521	0.074
R_a (pu)	0.0035	0.0026	0.003
H (sec)	23.64	6.4	4.137

جدول (۲): مشخصات خطوط

شماره باس	شماره باس	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
4	5	0.007	0.085	0.088
4	6	0.012	0.092	0.079
5	7	0.025	0.161	0.153
6	9	0.03	0.17	0.165
8	7	0.0065	0.072	0.0745
8	9	0.0098	0.1008	0.1205

جدول (۳): مشخصات بارها

بار	P ₀ (MW)	Q ₀ (MVar)	n _p	n _q
Load A	125	50	1.5	2
Load B	90	30	1.5	2
Load C	100	35	1.5	2

- No. 2, pp. 601-612, 2008.
- [9]- Bhatt, P., Roy, R., Ghoshal, S., "Dynamic participation of doubly fed induction generator in automatic generation control", *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 1203-1213, 2011.
- [10]- Vas, P., *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford university press, 1998.
- [11]- Akhmatov, V., *Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Ørsted-DTU, 2003.
- [12]- Gonzalo Abad, J. L., Miguel Rodriguez, Luiz Marroyo, Grzegorz Lewanski, *Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation*, John Wiley & Sons, 2011.
- [13]- Claudio Tarnowski, G., "Coordinated Frequency Control of Wind Turbines in Power Systems with High Wind Penetration", Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, 2011.
- [14]- Ramtharan, J. B. E. G., Jenkins, N., "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-9, 2007.
- [15]- Chang-Chien, L. R., Lin, W. T., Yin, Y. C., "Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 710-718, 2011.
- [16]- Mauricio, A. M., Antonio Gómez-Expósito, José Luis Martínez Ramos., "Frequency Regulation Contribution Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems", *IEEE Transactions on*
- مراجع
- [1]- Holdsworth, L., Wu, X., Ekanayake, J., Jenkins, N., "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances", *IEE Proceedings in Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, No. 3, pp. 343-352, 2003.
- [2]- National Grid Transco. Extracts from the grid code connection conditions, June 2004, <http://www.nationalgrid.com>.
- [3]- Machowski, J., Bialek, J., Bumby, J., *Power system dynamics: stability and control*, Wiley, 2011.
- [4]- Kundur, P., *Power system stability and control*, Mc Graw-Hill, 1993.
- [5]- Anaya-Lara, O., Hughes, F. M., Jenkins, N., Strbac, G., "Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation", *IEE Proceedings in Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 153, No. 2, pp. 164-170, 2006.
- [6]- Zhang, Z.-S., Sun, Y.-Z., Lin, J., Li, G.-J., "Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 6, No. 1, pp. 38-47, 2010.
- [7]- Akbari, M., "Participation of DFIG based wind turbines in improving short term frequency regulation", *Electrical Engineering (ICEE)*, 18th Iranian Conference on, pp. 874-879, 2010.
- [8]- Ullah, N. R., Thiringer, T., Karlsson, D., "Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines: Potential and applications", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23,

¹⁰ Particle Swarm Optimization

¹¹ Particle

¹² Cost Function

¹³ Population

¹⁴ Iteration

Power systems, Vol. 24, No. 1, pp. 173-180, 2009.

- [17]- Anderson, P., Fouad, A., Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [18]- Ma, H. T., Chowdhury, B. H., "Working towards frequency regulation with wind plants: Combined control approaches", IET Renewable Power Generation, Vol. 4, No. 4, pp. 308-316, 2010.
- [19]- Durga Gautam, Lalit Goel., Raja Ayyanar., "Control Strategy to Mitigate the Impact of Reduced Inertia Due to Doubly Fed Induction Generators on Large Power Systems", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 26, No. 1, pp. 214-224, 2011.
- [20]- Zertek, A., Verbic, G., Pantos, M., "Optimised control approach for frequency-control contribution of variable speed wind turbines", IET Renewable Power Generation, Vol. 6, No. 1, pp. 17-23, 2012.
- [21]- Ramtharan, G., Ekanayake, J. B., Jenkins, N., "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines", IET Renewable Power Generation, Vol. 1, No. 1, pp. 3-9, 2007.
- [22]- Vidyanandan, N. S. K. V., "Primary Frequency Regulation by Deloaded Wind Turbines Using Variable Droop", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 28. No. 2, pp. 837-846, 2012.
- [23]- Camblong, H., "Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds", Control Engineering Practice, Vol. 16, No. 8, pp. 946-958, 2008.
- [24]- Mustafa Kayikci, J. V. M., "Dynamic Contribution of DFIG-Based Wind Plants to System Frequency Disturbances", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 859-867, 2009.
- [25]- Akbari, M., Madani, S. M., "A new method for contribution of DFIG-based wind farms in power system frequency regulation", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2010.

¹ DFIG: Doubly-Fed Induction Generator

² Short Term Frequency Control

³ Inertial Response

⁴ Primary Frequency Control

⁵ Secondary Frequency Control

⁶ AGC: Automatic Generation Control

⁷ MPPT: Maximum Power Point Tracking

⁸ Effective Inertia

⁹ Uncertainty