کنترل تطبیقی فرکانس شبکه بوسیله ژنراتورهای القایی تغذیه دوسویه با بهره گیری از روش داده محور

محمد وریج کاظمی[۱] سید اصغر غلامیان[۲] سید جلیل ساداتی[۳]

۱- دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران - بابل
m.v.kazemi62@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران – بابل
gholamian.noshirvani@gmail.com

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران – بابل
j.sadati@nit.ac.ir

چکیده: امروزه جهت مشارکت توربین های بادی در کنترل فرکانس شبکه معمولا شیوه های کنترل دروپ و اینرسی برای توربین های بادی سرعت متغیر مورد استفاده قرار می گیرد. تنظیم بهره های حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی بر عملکرد توربین های بادی بسیار تاثیرگذار است ولی به علت متغیر بودن سرعت باد و شرایط شبکه، تنظیم ضرایب کنترلی مذکور که در همه شرایط بهترین پاسخ را تولید نمایند امر محالی به نظر می رسد. در این مقاله یک روش جدید جهت تنظیم تطبیقی بهره حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی ژنراتور القایی تغذیه دو سویه (DFIG) ارایه شده است همچنین به علت رهایی از مشکلات و ایرادات مدلسازی توربین بادی و شبکه استفاده از روش داده محور که فقط بر اساس ورودی و خروجی سیستم عمل می کند پیشنهاد شده است. در ایده جدید ارایه شده جهت کنترل سریعتر و جلوگیری از افت شدید فرکانس، معادلات جدیدی برای بروز رسانی ضرایب حلقه های کنترلی با استفاده از مشتق دوم خطا محاسبه گردیده که در تنظیم تطبیقی بهره حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی مورد استفاده قرار گرفته شده است. در شیوه کنترلی پیشنهادی ابتدا با استفاده از KVNN خروجی لحظه بعدی تخمین زده می شود و سپس با استفاده از ماتریس هیسین ضرایب حلقه های کنترلی فرکانس بصورت تطبیقی تنظیم می شوند. نتایج شبیه سازی برای یک مزرعه بادی DFIG عملکرد مناسب روش تطبیقی مبتنی بر کنترل داده محور را در افزایش کمترین مقدار فرکانس و بهبود فرکانس شبکه در حالت دائمی و گذرا به هنگام وقوع خطا نشان می دهد.

کلمات کلیدی: توربین بادی، ژنراتور القایی تغذیه دو سویه، کنترل تطبیقی ، کنترل داده محور ، ماتریس هیسین.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳

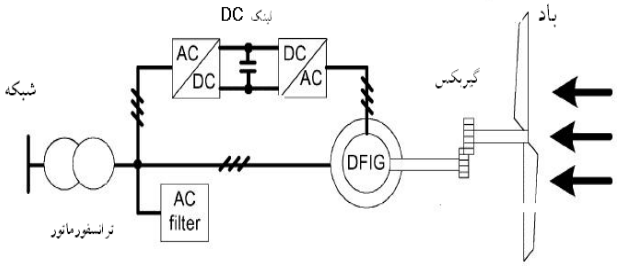
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید اصغر غلامیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران –بابل– دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در میان ساختارهای مختلف توربین های بادی که توانایی کار در سرعت های مختلف و فرکانس ثابت را دارند ژنراتورهای القایی تغذیه دو سویه (DFIG) از اهمیت و مقبولیت ویژه ای برخوردار هستند زیرا DFIG بالا و پایین سرعت سنکرون کار می کند و توان نامی کانورتور ۲۰٪-۳۰٪ توان نامی ژنراتور می باشد که این امر سبب کاهش هزینه و تلفات کانورتور می شود. همچنین ژنراتور القایی تغذیه دو سویه توانایی جذب و تولید توان راکتیو را دارد. ساختار متصل به شبکه DFIG برای تولید انرژی بادی در شکل۱ نشان داده شده است. سیم پیچ استاتور این ژنراتور بصورت مستقیم و سیم پیچ رتور آن از طریق یک مبدل فرکانسی به شبکه متصل است. [1,2]

یکی از تفاوت های توربین های بادی با ژنراتور های سنکرون در نیروگاه های سنتی، مستقل بودن توان اکتیو خروجی آن ها از فرکانس شبکه می باشد. برخلاف ژنراتورهای سنکرون، توربین های بادی به طور ذاتی انرژی ذخیره شده ای جهت آزاد سازی به هنگام اغتشاشات فرکانسی ندارند. اگر توان تولیدی شبکه قدرت و توان مصرفی شبکه با هم برابر نباشند فرکانس شبکه متناسب با اینرسی سیستم تغییر می کند. با افزایش نفوذ توربین های بادی در شبکه اینرسی سیستم های



شکل (۱): شمای DFIG برای تولید برق- بادی

قدرت کاهش و نوسانات فرکانسی افزایش می یابد به همین علت اخیرا در قوانین و استانداردها حلقه های اضافی کنترلی فرکانس برای توربین ها و مزارع بادی پیشنهاد شده است[۳-۲۶].

بعضی از محققین جهت کنترل فرکانس شبکه با الهام گرفتن از ژنراتورهای سنکرون سنتی متد کنترل دروپ را برای توربین های بادی پیشنهاد کرده اند. روش های کنترلی مبتنی بر کنترل دروپ، فرکانس سیستم را در حالت ماندگار بهبود می بخشند[۵-۶]. در مرجع[8-7] برای مشارکت در پاسخ اولیه فرکانس تنظیم کنترل دروپ برای منابع تولید پراکنده ای که در شبکه توزیع نصب شده اند، پیشنهاد شده است. در این روش کنترل دروپ متناسب با مکان و توان این منابع با خطی سازی معادلات پخش بار بهینه می شود و ضریب دروپ متغیر با زمان برای جلوگیری از افت شدید انرژی جنبشی توربین بادی پیشنهاد گردیده و برای پیاده سازی آن بر روی بیشترین توان قابل دریافت از توربین بادی تمرکز شده است.

مقالات علمی زیادی به هنگام اغتشاشات فرکانسی تمرکز بر انرژی اینرسی توربین بادی را برای بهبود حالت گذرا فرکانس پیشنهاد نموده اند[۹-۱۰]. در مرجع [۱۱] توان تزریقی توربین بادی به شبکه با دو استراتژی مختلف با کنترل انرژی جنبشی تنظیم شده است. در این روش ها با هدف کنترل فرکانس شبکه با تنظیم نمودارها و نرخ تغییرات فرکانس از افت شدید سرعت توربین بادی جلوگیری می شود. استفاده همزمان از حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی برای بهبود نرخ تغییرات فرکانس و افست فرکانسی بیان گردیده است[۱۲-۱۳]. ترکیب حلقه های کنترلی کمترین فرکانس شبکه را به هنگام اغتشاش افزایش می دهد. افزایش بهره هر دو حلقه کنترلی سبب بهبود کمترین فرکانس شبکه به هنگام اغتشاش می گردد ولی افزایش زیاد این بهره ها سبب کاهش شدید سرعت رتور می گردد. با توجه به اینکه بهره های حلقه های کنترلی اعداد ثابتی می باشند تنظیم آن ها در بهترین مقدار خود بسیار پیچیده و مشکل است و تنظیم بر روی اعدادی که در تمامی سرعت های باد، به هنگام تمامی اغتشاشات فرکانسی شبکه و با تمامی بارهای مصرفی به بهترین پاسخ فرکانسی بیانجامد امری محال به نظر می رسد. ترکیب کنترل دروپ و کنترل اینرسی برای حفظ پایداری شبکه و واحد های تولید پراکنده پیشنهاد شده است[۱۴]. در این روش جبران تغییرات زاویه فرکانسی و ولتاژ شبکه و کاهش نوسانات آن ها با تقسیم متناسب توان اکتیو و راکتیو بین کلیه منابع صورت گرفته است.

علاوه بر این مطالب اخیرا نرخ تغییرات توان اکتیو خروجی توربین های بادی به عنوان یک پارامتر محدود کننده روش های کنترل فرکانس مطرح شده است. افزایش زیاد این نرخ سبب فرسودگی و خستگی در ژنراتورهای بادی می شود و هزینه تعمیر و نگهداری را به شدت افزایش می دهد. اکنون محدودیت نرخ توان اکتیو خروجی توربین های بادی ۰,۲(pu/s) پیشنهاد شده است[۱۵]. شایان ذکر است که افزایش بهره حقله های کنترلی فرکانس سبب افزایش نرخ مذکور می گردد.

برای طراحی و تنظیم حلقه های کنترلی در روش های موجود ارایه یک مدل خوب از توربین بادی به عنوان یک نکته کلیدی مطرح است. به هنگام پیشنهاد مدل های توربین بادی عملکرد مناسب آن ها در دو زمان زیر بسیار مهم است ۱) رفتار دینامیکی توربین بادی به هنگام اغتشاش در شبکه های قدرت[۱۶] ۲) رفتار دینامیکی توربین بادی به هنگام تغییرات باد[۱۷]. از این جهت مقالات زیادی بر روی ارایه یک مدل مناسب از توربین بادی به منظور کنترل فرکانس مطلوب تمرکز کرده اند ولی ارایه یک مدل مناسب جهت برآورده کردن دو هدف فوق که به طراحی مناسب حلقه های کنترل فرکانس بیانجامد بسیار مشکل است[۱۸]. در حالت کلی مشکل مدل‌سازی در طراحی کنترلر در تمامی سیستم ها وجود دارد از این رو استفاده از روش های داده محور که بدون استفاده از مدل سیستم به طراحی کنترلر می‌پردازد معرفی

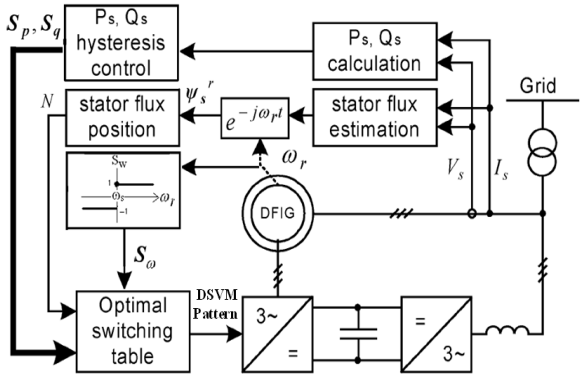
شده است[۳۱-۳۳] ولی تاکنون از روش های داده محور در کنترل فرکانس شبکه استفاده نشده است.

با توجه به مطالب فوق یک روش کنترل تطبیقی که توانایی تنظیم ضرایب حلقه های کنترل دروپ و اینرسی را در شرایط مختلف باد و شبکه بدون نیاز به مدل سازی سیستم داشته باشد ضروری به نظر می رسد لذا این مقاله یک روش جدید جهت کنترل تطبیقی حلقه های کنترل دروپ و کنترل اینرسی را با استفاده از روش داده محور برای DFIG پیشنهاد می نماید. روش داده محور بدون نیاز به مدل توربین های بادی و شبکه و فقط بر اساس اطلاعات ورودی خروجی سیستم عمل می کند. همچنین روش داده محور نسبت به تغییرات سیستم و تاخیر های زمانی کنترلر بسیار مقاوم است[۱۹-۲۰]. روش های موجود تنظیم ضرایب PD بر اساس روش گرادیان نزولی از مشتق مرتبه اول خطا نسبت به ضرایب PD استفاده می نمایند. این مقاله با تحلیل تاثیرگذاری مشتق دوم خطا در مدار کنترل فرکانس با ارائه یک فرمول بندی جدید، استفاده از ماتریس هیسین خطا برای تنظیم تطبیقی ضرایب حلقه های کنترل دروپ و اینرسی را به هنگام پیاده سازی روش داده محور پیشنهاد می نماید.

در این مقاله در بخش ۲ درباره کنترل DFIG در توربین بادی و چگونگی دنباله روی توان های اکتیو و راکتیو از مقادیر مرجعشان بحث شده است سپس در بخش ۳ درباره نحوه کنترل فرکانس DFIG توضیح داده شده است. در بخش ۴ روش آموزش داده محور و آموزش تنبل بیان شده و در ادامه روش KVNN (**K-Vector Nearest Neighborhood**) بطور کامل شرح داده شده است. در بخش ۵ به ارایه روش به روز رسانی تطبیقی ضرایب کنترلی حلقه های دروپ و اینرسی با استفاده از روش های داده محور پرداخته شده و مشتق دوم برای تنظیم ضرایب PD پیشنهاد و فرمول بندی شده است در انتها در بخش ۶ نتایج شبیه سازی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی بر روی شبکه نمونه شامل توربین های بادی DFIG به هنگام وقوع اغتشاشات فرکانسی در ۴ حالت مختلف بررسی شده و خروجی ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- کنترل ژنراتورهای القایی تغذیه دوسویه در توربین های بادی

استاتور ژنراتورهای القایی تغذیه دوسویه به صورت مستقیم به شبکه و معمولا رتور آن از طریق دو کانورتور پشت به پشت به شبکه متصل است. در اکثر روش های کنترلی کانورتور سمت شبکه جهت ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC استفاده می شود و وظیفه اصلی کنترل و رسیدن به اهداف کنترلی بر عهده کانوتور سمت رتور می باشد. روش های کنترلی با اهداف کنترلی متفاوتی برای DFIG مطرح شده است. معمولا در عمل از آنجا که وظیفه ذاتی هر ژنراتوری تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه می باشد روش های کنترل توان DFIG از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



شکل (۲): شمای کلی کنترل مستقیم توان

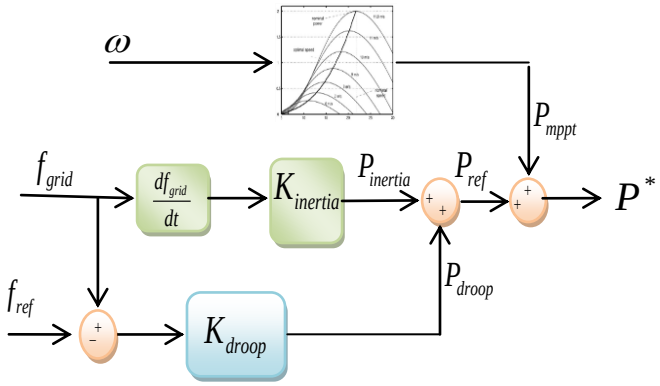
جزییات مدل الکتریکی و روش کنترل مستقیم توان برایDFIG در [۲] بیان شده است. بلوک دیاگرام این روش کنترلی در شکل ۲ به نمایش درآمده است. هدف از کنترل مستقیم توان کنترل مستقیم و مستقل توان اکتیو و راکتیو و دنباله روی توان ها از مقادیر مرجع شان در شرایط مختلف سرعت باد است. در روش های کنترل مستقیم توان چگونگی محاسبه بهترین مرجع توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه بیان نشده است در واقع درباره بهترین توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز شبکه بحث نشده است. در عمل معمولا مناسب ترین مرجع توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها به ترتیب خروجی کنترلر فرکانس و ولتاژ شبکه می باشد. در این مقاله مرجع توان اکتیو DFIG از حلقه های کنترل فرکانس محاسبه می گردد.

۳- کنترل فرکانس ژنراتورهای القایی تغذیه دوسویه در توربین های بادی

معادله توان تزریقی به شبکه توسط DFIG در فرمول ۱ بیان شده است.

$$P^* = P_{mppt} + K_{droop}\left(f_{grid} - f_{ref}\right) + K_{inertia}\left(\frac{df_{grid}}{dt}\right) \qquad (۱)$$

P_{mppt} بیشترین توان قابل استحصال از توربین بادی در حالت کار نرمال است که معمولا به ازای زاویه پیچ صفر بدست می آید و f_{ref} فرکانس مرجع شبکه ، f_{grid} فرکانس شبکه و P^* توان مرجعی است که توربین بادی به شبکه باید تزریق نماید. مطابق شکل ۳ از هر یک از روش های کنترل دروپ یا کنترل اینرسی یا ترکیب آن ها می توان استفاده کرد. کنترل دروپ به اختلاف فرکانس شبکه از فرکانس مرجع $P_{droop} = f_{grid} - f_{ref}$ و کنترل اینرسی به نرخ تغییرات فرکانس شبکه



شکل (۳): کنترل دروپ و کنترل اینرسی

$P_{inertia} = K_{inertia}\left(\frac{df_{grid}}{dt}\right)$ وابسته است. استفاده همزمان کنترل دروپ و اینرسی به بهره جستن از کنترلر PD می انجامد.

استفاده از کنترل دروپ سبب کاهش خطای حالت ماندگار فرکانس شبکه می شود و استفاده از کنترلر اینرسی سبب می شود که در حالت گذرا که تغییرات سریع فرکانس رخ می دهد توان مرجع بزرگی برای DFIG تولید گردد و پایداری فرکانسی سیستم بهبود یابد. مجموع توان خروجی مدار کنترلر دروپ و اینرسی که به عنوان توان مرجعی که مدار کنترلر فرکانس تولید می‌نماید ($P_{ref} = K_{droop}\left(f_{grid} - f_{ref}\right) + K_{inertia}\left(\frac{df_{grid}}{dt}\right)$) شناخته می شود.

در اکثر روش های کنترلی و مقالاتی که در زمینه کنترل فرکانس شبکه بیان شده ضرایب $K_{inertia}$, K_{droop} ثابت در نظر گرفته شده اند. در بعضی مقالات تاثیر تغییرات این پارامترها بر عملکرد کنترل فرکانس DFIG بیان شده است. در این مقالات با انجام شبیه سازی های مناسب تاثیر زیاد این دو پارامتر در شرایط مختلف باد و شبکه نشان داده شده و اهمیت تنظیم درست این پارامتر ها بر تنظیم فرکانس شبکه و استرس های مکانیکی وارد بر روتور تاکید شده است. ولی در این مقالات روشی برای کنترل تطبیقی کنترلر فرکانس در شرایط مختلف بیان نشده است.[۵-21]

در هنگام بروز یک اغتشاش و عدم تعادلی بزرگ بین توان تولیدی و مصرفی افزایش ضرایب PD در کنترلر فرکانس سبب بهبود فرکانس شبکه می باشد ولی از طرفی افزایش بیش از حد این ضرایب سبب ناپایداری توربین بادی، کاهش شدید سرعت رتور و استرس های مکانیکی شدید به DFIG می گردد؛ لذا تنظیم مناسب ضرایب در نامتعادلی های متفاوت و در سرعت های متفاوت باد از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ به بیان دیگر امکان تنظیم ضرایب ثابت برای کنترلرPD که در تمام شرایط بهترین پاسخ را فراهم نماید وجود ندارد و این ضرایب باید متغیر با شرایط باد، شبکه، افت فرکانس و نرخ افت فرکانس باشند.

در مرجع [۲۲] فقط کنترلر تطبیقی دروپ برای تنظیم فرکانس شبکه پیشنهاد شده و تنظیم ضریب دروپ وابسته به نرخ تغییر فرکانس و سرعت رتور و میزان افت فرکانس شده است و این روش در [۲۳] تکمیل و بهبود می یابد ولی در این مقالات چگونگی تنظیم و محاسبه بهترین نمودار و جزییات عملی برای این تنظیم تطبیقی کنترلر دروپ در ژنراتورها و شبکه های مختلف بیان نشده است.

۴- روش کنترل داده محور

کنترل کننده داده محور (DDC) تئوری و روش کنترلیست که تنها از داده ورودی و خروجی آنلاین یا آفلاین سیستم کنترل شده و بدون بهره بردن مستقیم یا غیر مستقیم از اطلاعات بدست آمده از مدل ریاضی استفاده می کند. همگرایی و مقاوم بودن این کنترل کننده با آنالیز دقیق و تحت مفروضات منطقی تضمین می شود. در بسیاری از برنامه های کنترل فرآیند، به دلیل نبودن اطلاعات کافی از پروسه و پیچیده بودن دینامیک سیستم، توابع توصیف کننده سیستم دور از دسترس می باشند. در روش کنترل داده محور، اطلاعات دقیق از پروسه و هیچگونه سیستم شناسایی مورد نیاز نبوده و صرفا اندازه گیری ورودی و خروجی سیستم کنترل کننده انجام می گیرد. این بدین معنی است که می توان از یک کنترل کننده عمومی جهت کنترل کلاس بخصوصی از فرآیندهای صنعتی، به طور مستقل استفاده کرد و لذا لزومی به طراحی کنترل کننده اختصاصی برای هر فرایند نمی باشد.

از دیگر مزایای کنترل کننده داده محور، عدم نیاز به تنظیم دستی پیچیده پارامترهای کنترلی، عدم نیاز به سیگنال آزمایشی پروسه یادگیری، کنترل کننده ارزانتر و سریعتر نسبت به نمونه های مشابه، سادگی و راحتی اجرا، حجم محاسباتی کم، مقاومت بالا در برابر تغییرات فرایندی سیستم و تضمین همگرایی سیستم با فرض محدود بودن ورودی خروجی سیستم می باشد. یکی از روش های مناسب، ساده و پرکاربرد کنترل داده محور روش کنترل تنبل می باشد.[28-29]

۴-۱) روش آموزش تنبل

در روش آموزش تنبل تخمین مقدار تابع y_q در نقطه پرسش Φ_q با تمرکز بر روی همسایگی های آن انجام می پذیرد. این ایده از ذخیره کردن حالت های پیشین سیستم و سپس تخمین خروجی فعلی بر اساس همسایگی های وضعیت فعلی استوار است.

فرض کنید از یک سیستم غیر خطی نامعلوم نگاشت $f:\mathrm{R}^m \to R$ با N نقطه $\{(\Phi_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$ و $\Phi_i = [\mathrm{x}_{i1}, \mathrm{x}_{i2}, \ldots\ldots, \mathrm{x}_{im}]^T$ در دست باشد.

Φ_i, y_i به ترتیب خروجی و ورودی در لحظه iام می با شند و x_{in} ، nامین ورودی در لحظه i ام می باشد.

ابتدا نقاط شبیه نقطه پرسش Φ_q از بانک اطلاعات انتخاب می شوند. در این الگورتم معیار شباهت بیشتر، کمتر بودن فاصله بین نقطه

پرسش و نقاط بانک اطلاعات می باشد به نحوی که اگر نقطه Φ_i فاصله اقلیدسی $d(\Phi_i,\Phi_q)=\|\Phi_i-\Phi_q\|$ کمتری با نقطه پرسش داشته باشد شباهت بیشتری با آن دارد. در نهایت بر اساس نقاط دارای بیشترین شباهت با نقطه پرسش تخمین تابع $y_q=f(\Phi_q)$ بدست می آید.[31-33]

۲-۴) روش K تا از نزدیک ترین بردارهای مجاور (K-VVN)

الگوریتم فوق برای تخمین نقطه پرسش به محاسبه فاصله با کل بردارهای اطلاعات موجود در کل بانک اطلاعات و مقایسه آنها نیاز دارد چنانچه بانک اطلاعات خیلی بزرگ و ابعاد مسله زیاد باشد این نکته از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین هنگامی که برای شباهت بین نقاط از معیار فاصله اقلیدسی استفاده شود فقط به اندازه توجه شده و زاویه بین نقاط مورد بررسی قرار نمی گیرد برای رفع مشکلات این الگوریتم K-VNN پیشنهاد می گردد. در این الگوریتم از دو معیار فاصله و زاویه برای شناسایی نزدیکترین همسایه استفاده می شود.

فرض کنیم سیستم قابل کنترل بصورت زیر باشد

$$y(t)=f(\phi(t-1))+\epsilon(t) \qquad (۲)$$

و $\phi(t-1)=\left[y(t-1),...,y(t-n_y),u(t-p),...,u(t-p-n_u)\right]$

y(t), u(t) , $\epsilon(t)$ به ترتیب ورودی سیستم ، خروجی سیستم و نویز سفید با میانگین صفر در لحظه t است.

فرمول ۲ توضیح فیزیکی سیستم ناشناخته با تابع $f(t)$ می باشد و N مجموعه اطلاعات $\{(\Phi_i,y_i)\}_{i=1}^{N}$ ورودی خروجی تابع در لحظه t وجود دارد. الگوریتم K-VNN اطلاعات شبیه نقطه پرسش را در N مجموعه اطلاعات جستجو می کند و K تا از نزدیک ترین نقاط را بصورت زیر شناسایی می کند.

۱. اگر $\cos(\Phi_i,\Phi_q(t))<0$ بدین معنا می باشد که بردار $\Phi_q(t)$ و ورودی Φ_i هیچ شباهتی ندارد و از آن نمی توان برای مدل سازی لحظه کنونی استفاده شود.

۲. در غیر این صورت از کسینوس زاویه بین بردارهای Φ_i , $\Phi_q(t)$ برای محاسبه معیار فاصله بصورت زیر محاسبه می گردد (K<< N)

$$\begin{cases} D(\phi_i,\phi_q)=\alpha e^{-d(\phi_i,\phi_q)}+(1-\alpha)\cos(\phi_i,\phi_q) \quad \alpha\in[0,1] \\ d(\phi_i,\phi_q)=\sqrt{\sum_{l=1}^{m}(x_{i,l}-x_{q,l})^2} \end{cases} \qquad (۳)$$

و از مجموعه اطلاعات موجود K بردار اطلاعات بر حسب فاصله بصورت زیر انتخاب می گردد

$$\begin{aligned} &\{(y(1),\phi(1)),(y(2),\phi(2)),...,(y(k),\phi(k))\} \qquad (۴) \\ &D(\phi(1),\phi(t))>D(\phi(2),\phi(t))>...>D(\phi(k),\phi(t)) \end{aligned}$$

در لحظات مختلف چگالی بردارهای اطلاعات $\Phi(t)$ در همسایگی بردار پرسش برابر نمی باشد. بنابراین تعداد بردار اطلاعات مناسب برای تخمین خروجی لحظه فعلی نامشخص است. جهت مدل کردن خطی سیستم در لحظه کنونی تعداد همسایه های انتخاب شده متغیر است به بیان دیگر $k\in[k_m,k_M]$ که k_m,k_M به ترتیب حد بالایی و پایینی تعداد همسایه ها می باشند. برای محاسبه مدل خطی $\hat{\beta}_{k+1}$ با استفاده از ۱ + k همسایه بصورت مستقیم از $\hat{\beta}_k$ که از k همسایه بدست آمده استفاده می کنیم. در حالت کلی مدل سیستم بصورت زیر محاسبه می گردد :

$$\begin{cases} v(k+1)=v(k)-\dfrac{v(k)\phi_{k+1}D_{k+1}\phi_{k+1}{}^T v(k)}{1+D_{k+1}\phi_{k+1}{}^T v(k)\phi_{k+1}} \\ \gamma(k+1)=v(k+1)\phi_{k+1}D_{k+1} \\ e(k+1)=y_{k+1}-\phi_{k+1}{}^T\hat{\beta}(k) \\ \hat{\beta}(k+1)=\hat{\beta}(k)+\gamma(k+1)e(k+1) \end{cases} \qquad (۵)$$

متد بازگشتی فوق بر اساس ایده کمترین مربعات خطا پایه گذاری شده است.

$$e_i^{loo}(k+1)=\frac{y_i-\phi_i^T\hat{\beta}(k+1)}{1-\phi_i^T v(k+1)\phi_i} \qquad (۶)$$

$e_i^{loo}(k+1)$ خطای تخمین با در نظر گرفتن k همسایه، بین y_i و مقدار تخمین زده شده خروجی با خارج کردن i امین نمونه از همسایگی های انتخاب شده از بانک اطلاعات است. مدل بازگشتی ارایه شده فرمول ۶ همه پارامترهای لازم برای محاسبه خطاهای Leave-one-out را محاسبه می نماید. $e_i^{loo}(k+1)$ شامل خطا در مدل خطی تولید شده بوسیله k تا از نزدیک ترین بردارهای همسایه نقطه پرسش است. پارامتر $MSE^{loo}(k+1)$ که اعتبار میانگین مربعات خطا Leave-one-out است بوسیله رابطه ۷ محاسبه می گردد.

$$MSE^{loo}(k+1)=\frac{\sum_{i=1}^{k+1}D_i\left(e_i^{loo}(k+1)\right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{k+1}D_i\right)} \qquad (۷)$$

با استفاده از متد winner takes all بهترین مدل را برای پیش بینی انتخاب می نماییم. پروسه تخمین بازگشتی به پایان می رسد اگر

$$MSE^{loo}(k+1)>MSE^{loo}(k),\ k+1\in[k_{min},k_{max}] \qquad (۸)$$

هنگامی که رابطه ۸ برقرار باشد مدل $\hat{\beta}(k+1)$ تخمین نامناسب تری از مدل $\hat{\beta}(k)$ است و در این هنگام رویه بازگشتی با انتخاب k همسایه اتمام می یابد و در غیر اینصورت $k=k_{\max}$ همسایه جهت مدل نمودن نقطه پرسش انتخاب می گردد.

بر اساس رویه مدل کردن توضیح داده شده در روابط فوق تعداد $k\in[k_m,k_M]$ همسایه جهت محاسبه مدل خطی $\hat{\beta}$ و تخمین $\hat{y}_k$ با بررسی $MSE^{loo}(k+1)$ بدست می آید. این رویه ارزیابی سبب بدست آوردن بهترین رگرسیون خطی بر پایه بردارهای اطلاعات می گردد که بهترین مدل خطی محلی در شرایط کنونی را ایجاد می نماید.

نکته مهم در الگوریتم KVNN بروز رسانی بانک اطلاعات است. بردار اطلاعات Φ_q که خروجی کنونی سیستم برای آن تخمین زده می شود می تواند به بانک اطلاعات اضافه گردد. برای این نکته چگالی $\{D_i\}_{i=1}^{k_{\max}}$ بردارهای اطلاعات در اطراف بردار Φ_q تعیین کننده است. استراتژی بروزرسانی بانک اطلاعات به صورت زیر است.

۱. اگر $D_1=1$ بدین معنی است که یک بردار اطلاعات برابر بردار Φ_q در بانک اطلاعات وجود دارد.

۲. اگر $D_1<1\ ,\ D_\rho<\delta\ (\rho<\mathrm{k}_{\max})$ بدین معنی می باشد که چگالی اطلاعات در اطراف Φ_q به اندازه کافی می باشد و در نتیجه این بردار به بانک اطلاعات اضافه نمی گردد.

۳. در غیر اینصورت Φ_q به بانک اطلاعات اضافه می گردد.

۵- ارایه روش جدید جهت به روز رسانی کردن ضرایب کنترلر دروپ و اینرسی

الگوهای بهینه سازی تابع هزینه خطا که بصورت تکراری می باشند با یک شرایط اولیه ای شروع می شوند و سپس در هر گام با رابطه زیر بهبود می یابند.

$$\Delta x(k)=x(k+1)-x(k)=\eta(k)\,p(k) \qquad (9)$$

که $p(k)$ بردار راستای جستجو و $\eta(k)$ نرخ آموزش در گام k ام است. در روش گرادیان نزولی مقدار بردار راستای جستجو برابر است با منفی مشتق تابع هزینه و در نتیجه داریم

$$x(k+1)=x(k)-\eta(k)\,g(k) \qquad (10)$$

که بردار $g(k)$ بردار مشتق تابع هزینه خطا نسبت به پارامتر $x(k)$ می باشد. از انجا که پارامترهای بهینه سازی ضرایب کنترلر PD هستند

$$g=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial J}{\partial k_p}\\[2ex]\dfrac{\partial J}{\partial k_d}\end{bmatrix}\ ,\ \mathrm{J(k)}=\frac{1}{2}\,\mathrm{e(k)}^2\ ,\ e(k)=y_r(k)-y(k) \qquad (۱۱)$$

الگوریتم کنترل بصورت زیر است :

$$\begin{cases}K_p(k)=K_p(k-1)+\Delta K_p\\ K_d(k)=K_d(k-1)+\Delta K_d\end{cases} \qquad (۱۲)$$

$$u(k)=u(k-1)+K_p(k)x_{c1}+K_d(k)x_{c2} \qquad (۱۳)$$

$$x_{c1}=e(k)-e(k-1)\quad ,\quad x_{c2}=e(k)+e(k-2)-2*e(k-1)$$

$$\begin{cases}\Delta K_p=-\eta\dfrac{\partial J}{\partial K_p}=-\eta\dfrac{\partial J}{\partial y}.\dfrac{\partial y}{\partial u}.\dfrac{\partial u}{\partial k_p}=-\eta\,e(k)\dfrac{\partial y}{\partial u}\,x_{c1}\\[2ex]\Delta K_d=-\eta\dfrac{\partial J}{\partial K_d}=-\eta\dfrac{\partial J}{\partial y}.\dfrac{\partial y}{\partial u}.\dfrac{\partial u}{\partial k_d}=-\eta\,e(k)\dfrac{\partial y}{\partial u}\,x_{c2}\end{cases} \qquad (۱۴)$$

$\dfrac{\partial y}{\partial u}$ ژاکوبین اطلاعات است که بر اساس الگوریتم گفته شده KVNN محاسبه می شود.

از آنجا که این الگوریتم های یاد گیرنده فقط از مشتق اول استفاده می نمایند در اثر تکرارها در تنظیم ضرایب بویژه در کاربردهای تطبیقی و بهنگام با مشکل مواجه می شوند. لذا در این مقاله استفاده از روش های بهینه سازی با مرتبه بالا پیشنهاد می گردد. در بهینه سازی مرتبه اول، تابع فقط به وسیله عبارات خطی بسط تیلور تقریب زده می شود در صورتی که در بهینه سازی مرتبه دوم عبارات غیر خطی مرتبه دوم بسط تیلور که شامل مشتق های مرتبه دوم نیز هستند مورد استفاده قرار می گیرند که منجر به نتایج دقیقتری خواهد شد. به بیان دیگر این مقاله پیشنهاد می نماید عملکرد سیستم کنترلی در دو حالت زیر باید متفاوت باشد.

۱) هنگامی که خطا زیاد می شود و نرخ افزایش خطا هر لحظه نسبت به لحظه قبل افزایش می یابد (مشتق دوم خطا مثبت است)

۲) هنگامی که خطا زیاد می شود و نرخ افزایش خطا هر لحظه نسبت به لحظه قبل کاهش می یابد (مشتق دوم خطا منفی است)

در حالت ۱ وضعیت بحرانی تر می باشد و سیستم کنترلی نتوانسته تاکنون مناسب عمل نماید و خطا به شدت در حال افزایش است لذا سیستم کنترلی نیاز به یک تغییرات شدیدتری دارد ولی در حالت دوم با این حال که خطا افزایش می یابد(مشتق اول خطا مثبت است) ولی سیستم کنترلی توانسته است جلوی نرخ افزایشی خطا را بگیرد و تا حدودی مناسب عمل کرده است و احتمالا با ادامه شیوه کنترلی موجود (البته اگر بهبود به قدری کند نباشد که سیستم ناپایدار گردد) رشد نرخ تغییرات خطا صفر می گردد. همین تحلیل را بصورت

معکوس برای حالتی که نرخ تغییرات خطا منفی می باشد می توان مطرح کرد.

بسط تیلور جهت یافتن مقدار تابع در اطراف یک نقطه معلوم بصورت زیر است.

$$J(x(k+1)) = J(x(k)) + \Delta x(k)\nabla J(x(k)) + \frac{1}{2}\Delta x(k)\nabla^2 J(x(k))\Delta x^T(k) + ... \qquad (۱۵)$$

$$\nabla^2 J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_d} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_d} \end{bmatrix}$$

که $\nabla^2 J(x)$ را ماتریس هیسین می گویند.

از آنجا که کمینه نقاط $J(x(k+1))$ جایی قرار دارند که $\frac{\partial J(x(k+1))}{\partial x(k)}$ برابر صفر گردد.

$$g(k) + \mathrm{H(k)}.x(k) = 0 \;\rightarrow\; x(k+1) = x(k) - \mathrm{H(k)}^{-1} g(k) \qquad (۱۶)$$

لذا با توجه به نرخ یاد گیری

$$\begin{bmatrix} k_p(k+1) \\ k_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p(k) \\ k_d(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \eta_p \\ \eta_d \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_d} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_d} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial k_p} \\ \frac{\partial J}{\partial k_d} \end{bmatrix} e(k) \qquad (۱۷)$$

با توجه به معادلات فوق خواهیم داشت

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial y}{\partial u} x_{c1}\right)^2 & \left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)^2 .x_{c1}.x_{c2} \\ \left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)^2 .x_{c1}.x_{c2} & \left(\frac{\partial y}{\partial u} x_{c2}\right)^2 \end{bmatrix}^{-1} \qquad (۱۸)$$

که مشاهده میکنیم که ماتریس هیسین Positive Define نمی باشد لذا برای دور کردن ماتریس هیسین از شرایط تکین عبارت μI اضافه می گردد

$$x(k+1) = x(k) - \left(H(k) + \mu I\right)^{-1} g(k) \qquad (۱۹)$$

$$\begin{bmatrix} k_p(k+1) \\ k_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p(k) \\ k_d(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \eta_p \\ \eta_d \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_p \partial k_d} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_p} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_d \partial k_d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial k_p} \\ \frac{\partial J}{\partial k_d} \end{bmatrix} e(k) \qquad (۲۰)$$

در نتیجه خواهیم داشت :

$$\begin{bmatrix} k_p(k+1) \\ k_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p(k) \\ k_d(k) \end{bmatrix} - \frac{e(k)^2 \frac{\partial y}{\partial u} * \begin{bmatrix} \eta_p x_{c1} \\ \eta_d x_{c2} \end{bmatrix}}{\left(\frac{\partial y}{\partial u} x_{c2}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} x_{c1}\right)^2 + \mu} \qquad (۲۱)$$

اگر μ خیلی کوچک باشد معادله ۲۱ به معادله ۱۶ بسیار نزدیک می شود و اگر μ بسیار بزرگ باشد معادله ۲۱ به معادله ۱۴ نزدیک می شود.

۶- شبیه سازی

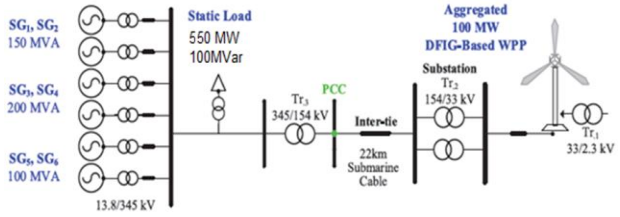
در شکل ۴ سیستم شبیه سازی شده در این مقاله به نمایش در آمده است چنانچه دیده می شود مجموع ژنراتورهای وصل شده به این شبکه ۹۰۰ MW و توان بار استاتیکی آن ۵۵۰MW , 100 MVar و مزرعه بادی متصل به شبکه با ژنراتورهای DFIG برابر ۱۰۰ MW می باشند. در این شبیه سازی فرکانس نامی ۵۰ Hz در نظر گرفته شده است.

ژنراتور های سنکرون :

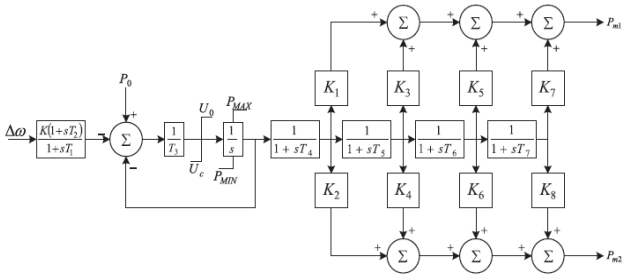
شش ژنراتور سنکرون شامل دو ژنراتور 100MW دو ژنراتور ۱۵۰MW دو ژنراتور ۲۰۰MW به شبکه متصل است. یک نیروگاه 100Mw گازی [35] یک نیروگاه 150Mwآبی [36] و بقیه نیروگاه ها بخار در نظر گرفته شده اند. برای همه ژنراتورها بهره دروپ ۵٪ در نظر لحاظ گردیده و در شکل ۵ و جدول ۱ مشخصات توربین بخار و ضرایب آن بیان شده و مشخصات نیروگاه گای و آبی در پیوست ۱ و ۲ بیان شده است. ثابت اینرسی برای ژنراتورهایMW ۱۰۰ برابر ۴ ، ژنراتورهایMW ۱۵۰ برابر۴,۳ و برای ژنراتورهایMW ۲۰۰ برابر ۵ است.

ژنراتور توربین بادی :

توربین بادی با یک ژنراتور DFIG با توان ۱۰۰ MW مدل شده است و از طریق یک ترانسفورماتور ۳۳/۲,۳ کیلو ولتی به شبکه و سپس با ۲۲Km کابل زیردریایی با ولتاژ ۱۵۴ Kv به بار و ژنراتورهای سنکرون متصل می شود. شکل ۶ منحنی توان DFIG و شکل ۷ محدودیت توان الکتریکی و گشتاور را در این مقاله نشان می دهد. برای بررسی بهتر و دقیق تر روش های کنترلی و تاثیر بهره های حلقه های کنترلی ۴ حالت مختلف مورد شبیه سازی و تحلیل قرار می گیرند.



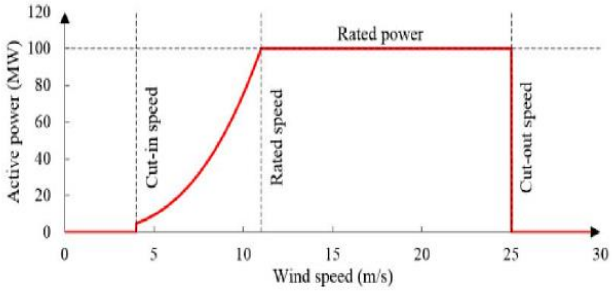
شکل (۴): شبکه مورد مطالعه



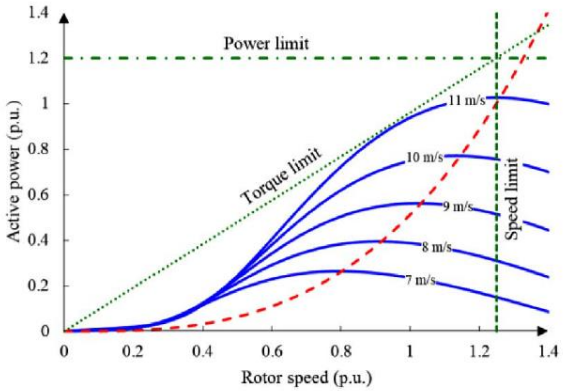
شکل (۵): مدل گاورنر برای توربین بخار IEEEG1

جدول(۱): پارامترهای گاورنر توربین بخار

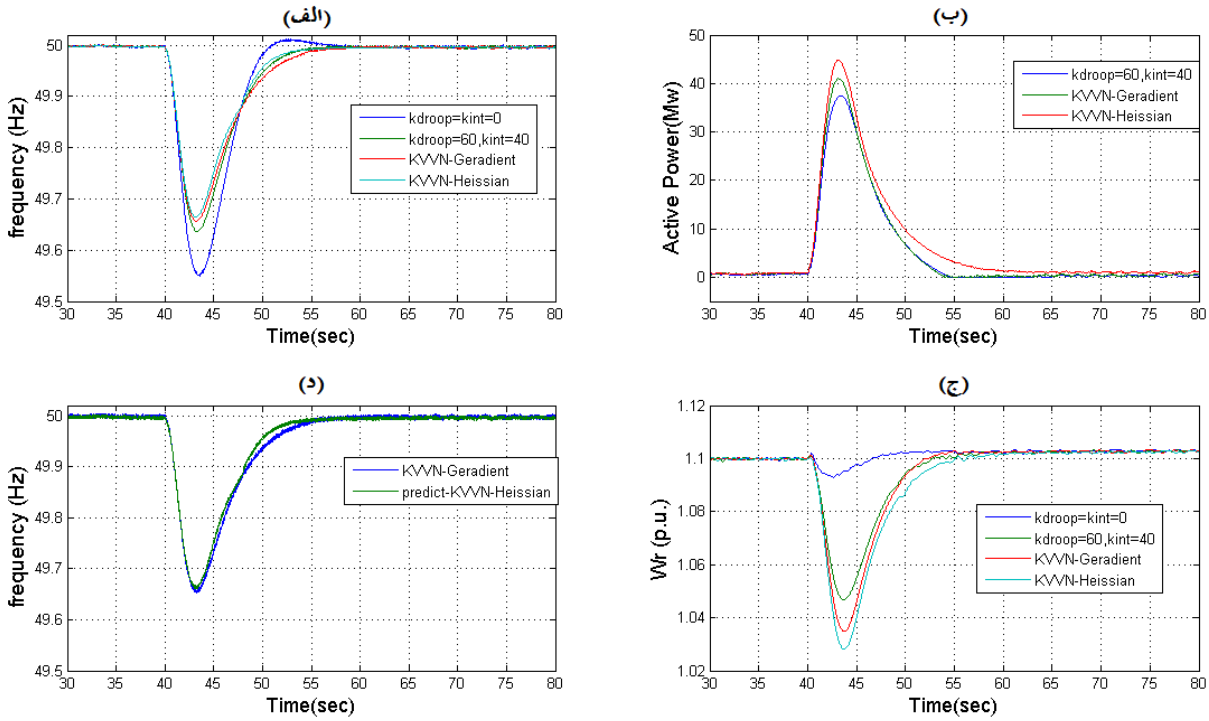
K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	P_{max}
20	0.3	0	0.4	0	0.3	0	0	0	1
T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	U_0	U_c	P_{min}
0.1	0	0.25	0.3	10	0.4	0	0.3	-0.5	0.33



شکل (۶): منحنی توان DFIG



شکل (۷): محدودیت های توان اکتیو و گشتاور



شکل (۸): نتایج فرکانس شبکه برای حالت ۱ الف) فرکانس شبکه ب) توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس ج) سرعت رتور DFIG د) فرکانس تخمین زده شده به روش داده محور

جدول (۲): مقایسه فرکانس شبکه برای حالت ۱

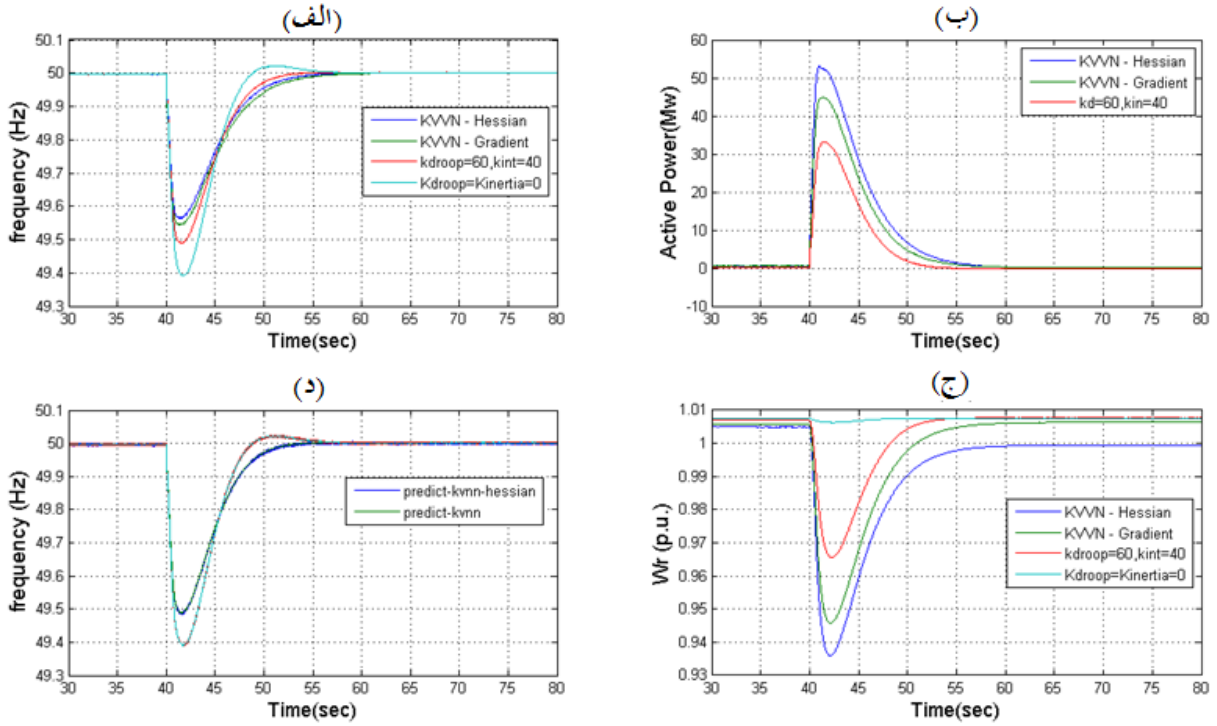
	K_{droop}=۰ $K_{inertia}$=0	K_{droop}=۶۰ $K_{inertia}$=۴۰	KVVN Gradient	KVVN Hessian
FN(Hz)	49.53	۴۹,۶۲	49.67	۴۹,۶۸
Max (ROCOF)	-0.490	-0.425	-0.335	-0.316

جهت تحلیل بهتر ایده پیشنهادی ۴ حالت در هر وضعیت شبیه سازی شده است. در اولین حالت کنترل کننده فرکانس برای توربین بادی وجود ندارد ($k_{droop} = 0$, $k_{int} = 0$) ، در دومین حالت کنترل کننده دروپ و اینرسی هر دو با ضریب ثابت $k_{droop} = 60$ k_{int}=40 , وجود دارند [27]، در حالت سوم از کنترل کننده K-VNN با اصلاح ضرایب کنترلر فرکانسی با استفاده از ایده گرادیان نزولی پیاده سازی شده است [33] و در حالت چهارم از کنترل کننده K-VNN با اصلاح ضرایب کنترلر فرکانسی با استفاده از ماتریس هیسین شبیه سازی شده است.

حالت اول) سرعت باد 11 m/s و نیروگاه بخاری 100MW از شبکه خارج می گردد

در این حالت سرعت باد 11 m/s می باشد و ژنراتور ۵ در لحظه ۴۰ s هنگامی که ۸۱MW توان تولید می کند از شبکه جدا می گردد. در شکل ۸ پارامترهای سیستم در ۴ حالت نشان داده شده است. در شکل ۸-الف فرکانس سیستم در حالت های مختلف به نمایش در آمده است. بیشینه مقدار ROCOF و کمترین مقدار فرکانس در حالت های فوق در جدول ۲ نشان داده شده است.

در روش هیسین به علت آن که توان بیشتری در لحظه خطا آزاد می شود افت سرعت بیشتر است- دقیقا به همین علت فرکانس شبکه کمترین افت را دارد- ولی چنانچه دیده می شود به سرعت به مقدار اولیه خود بازمی گردد. در لحظه t=54s سرعت ، توان و فرکانس هر سه تا به مقدار نامی قبل از خطا باز می گردند. یعنی در هنگام بازگشت فرکانس به مقدار نامی خود، توان اضافی تزریقی توسط کنترلر فرکانس کاهش می یابد و سرعت به مقدار نامی خود نزدیک می گردد. توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس و سرعت توربین بادی به ترتیب در اشکال ۸-ب و ۸-ج نشان داده شده اند. توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس هنگامی که فرکانس شبکه تقریبا برابر فرکانس مرجع است برابر صفر می گردد. چنانچه بیان شد وظیفه اصلی روش داده محور محاسبه ماتریس ژاکوبین و تخمین فرکانس برای گام بعدی با توجه به اطلاعات زمان های قبل می باشد، فرکانس تخمین شده توسط روش KVNN و فرکانس واقعی سیستم در شکل ۸-د به نمایش در آمده اند. چنانچه دیده می شود تخمین سرعت برای هر دو روش گرادیان نزولی و هیسین به خوبی صورت گرفته است. در واقع علت اصلی کنترل مناسب برای هر دو روش فوق تخمین صحیح ماتریس ژاکوبین می



شکل (۹): نتایج فرکانس شبکه برای حالت ۲ الف) فرکانس شبکه ب) توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس ج) سرعت رتور DFIG د) فرکانس تخمین زده شده به روش داده محور

جدول (۳): مقایسه فرکانس شبکه برای حالت ۲

	K_{droop}=۰ $K_{inertia}$=0	K_{droop}=۶۰ $K_{inertia}$=۴۰	KVVN Gradient	KVVN Hessian
FN(Hz)	۴۹,۳۹	۴۹,۴۸	۴۹,۵۵	۴۹,۵۸
Max (ROCOF)	-0.740	-0.690	-0.640	-0.604

باشد. در صورت تخمین اشتباه این ماتریس و در نتیجه تخمین اشتباه فرکانس خروجی تنظیم ضرایب کنترلر به خوبی صورت نمی گیرد.

حالت دوم) سرعت باد ۱۰ m/s و و نیروگاه بخاری 200MW از شبکه خارج می گردد

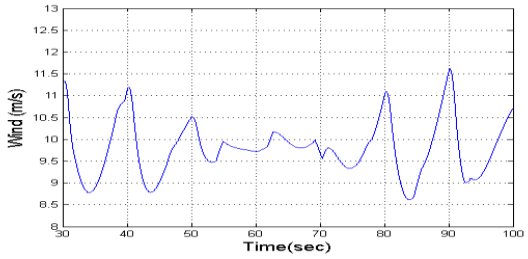
در این حالت سرعت باد m/s ۱۰ می باشد و ژنراتور ۳ در لحظه ۴۰ s هنگامی که ۷۲ MW توان تولید می کند از شبکه جدا می گردد در این مورد نسبت به حالت ۱ خطا در سرعت باد کمتر رخ می دهد لذا DFIG اینرسی کمتری برای آزادسازی توان دارد ولی در این مورد نسبت به مورد ۱ خطا برای ژنراتور بزرگتری اتفاق می افتد و ژنراتور بادی برای حفظ فرکانس باید توان بیشتری را به شبکه تزریق نماید. لذا همانطوری که در شکل۹ می بینیم افت فرکانس ها در تمامی ۴ حالت نسبت به حالت اول بیشتر می باشد. در شکل ۹-الف فرکانس سیستم در حالت های مختلف به نمایش در آمده و بیشینه مقدار ROCOF و افت فرکانس برای تغییرات فرکانس در ۴ حالت در جدول 3 نشان داده شده است. توان مرجع محاسبه شده توسط کنترلر فرکانسی در شکل ۹-ب و سرعت رتور ژنراتور در شکل ۹-د نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۹-ج ملاحظه می شود تخمین فرکانس به خوبی صورت گرفته است که این امر نشان دهنده عملکرد صحیح کنترل داده محور می باشد.

حالت ۳) وقتی سرعت باد متغیر است و ژنراتور 200Mw از شبکه جدا می گردد.

در این قسمت برای بررسی تاثیر تغییرات مداوم سرعت باد بر عملکرد سیستم کنترلی، سرعت باد مطابق شکل ۱۰ بصورت متغیر در نظر گرفته شده است. در لحظه t=40s ژنراتور سنکرون 200Mw که توان ۸۰ Mw را به شبکه تزریق می کند از شبکه خارج می شود. در شکل ۱۱ تغییرات فرکانس برای ۴ حالت نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می شود افت فرکانس نسبت به حالت قبل بیشتر می باشد. متغیر بودن سرعت باد سبب تغییر سرعت رتور و در نتیجه تغییر فرکانس می گردد. در شکل ۱۱-الف فرکانس سیستم در حالت های مختلف به نمایش در آمده و بیشینه مقدار ROCOF و افت فرکانس برای تغییرات فرکانس در ۴ حالت در جدول ۴ نشان داده شده است.
توان مرجع محاسبه شده توسط کنترلر های فرکانسی و سرعت رتور ژنراتور به ترتیب در اشکال ۱۱-ب و ۱۱-د نشان داده شده اند. گام نخست در عملکرد مناسب روش کنترلی پیشنهادی، عملکرد مناسب سیستم کنترل داده محور می باشد. وظیفه اصلی شیوه داده محور در سیستم کنترلی پیشنهادی تخمین صحیح فرکانس و تعیین ضرایب ماتریس ژاکبین می باشد. شکل ۱۱-ج تخمین مناسب فرکانس شبکه

جدول (۴): مقایسه فرکانس شبکه برای حالت ۳

	K_{droop}=۰ $K_{inertia}$=0	K_{droop}=۶۰ $K_{inertia}$=۴۰	KVVN Gradient	KVVN Hessian
FN(Hz)	۴۹,۲۱	۴۹,۲۴	۴۹,۳۹	۴۹,۴۲
Max (ROCOF)	-0.815	-0.782	-0.769	-0.722



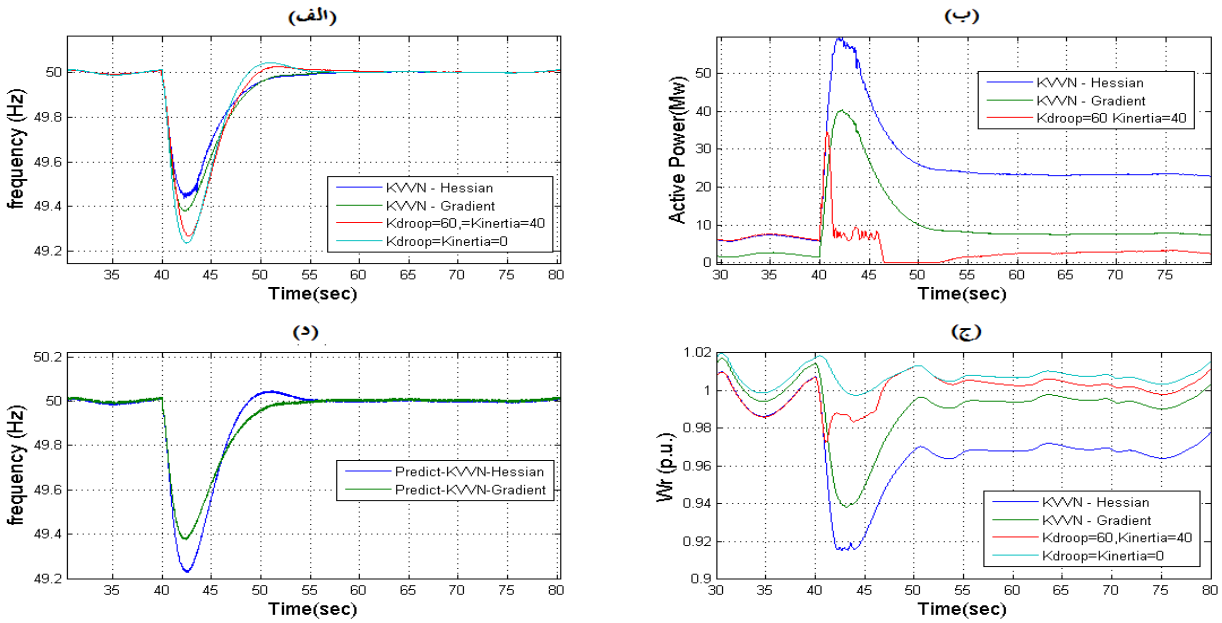
شکل (۱۰): سرعت باد برای حالت ۳

را برای دو حالت روش کنترل داده محور نشان می دهد. مقایسه اشکال ۱۱و ۹ نشان می دهد تخمینگر داده محور در حالت های سرعت ثابت و سرعت متغیر با عملکرد مناسبی دارد.

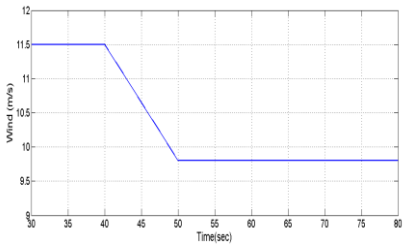
حالت چهارم) سرعت باد کاهش می یابد و نیروگاه بخاری 150MW از شبکه خارج می گردد:

در این قسمت برای بررسی کاهش سرعت باد بر عملکرد سیستم کنترلی، سرعت باد مطابق شکل ۱۲ در نظر گرفته شده و در بین لحظات ۴۰ الی ۵۰ ثانیه با شیب ثابت از 11.5m/s به مقدار m/s 9.7 کاهش می یابد. در لحظه t=40s ژنراتور سنکرون 150Mw که توان ۸۹ Mw را به شبکه تزریق می کند از شبکه خارج می شود. در شکل 13 همانند قسمت های قبل تغییرات فرکانس، میزان توان اکتیو، سرعت رتور و پیش بینی فرکانس حاصل از مدار کنترل فرکانس برای ۴ حالت نشان داده شده است. در شکل ۱۳-الف فرکانس سیستم در حالت های مختلف به نمایش در آمده است و در جدول ۵ به علت مقایسه بهتر و دقیق تر، کمترین فرکانس و بیشینه مقدار ROCOF بیان شده است. به دلیل کاهش سرعت باد و انرژی جنبشی توربین بادی در حین خطا افت فرکانس نسبت به تمامی حالت های قبل بیشتر می باشد. همچنین با مقایسه چهار حالت مشاهده می شود که فرکانس شبکه در سه حالت قبل شبکه در لحظه ۵۶ ثانیه و در این حالت در لحظه ۶۳ ثانیه به وضعیت دایمی خود می رسد.
توان مرجع محاسبه شده توسط مدار کنترلر فرکانسی در شکل ۱۳-ب و سرعت رتور ژنراتور در شکل ۱۳-د نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود به دلیل کاهش سرعت باد و وقوع خطا، کاهش شدید سرعت رتور اتفاق افتاده و نسبت به حالت های قبلی انرژی جنبشی کمتری به شبکه در حین خطا تزریق می گردد. ولی همانطور که در شکل ۱۳-ج نشان داده شده به علت تخمین مناسب فرکانس شبکه

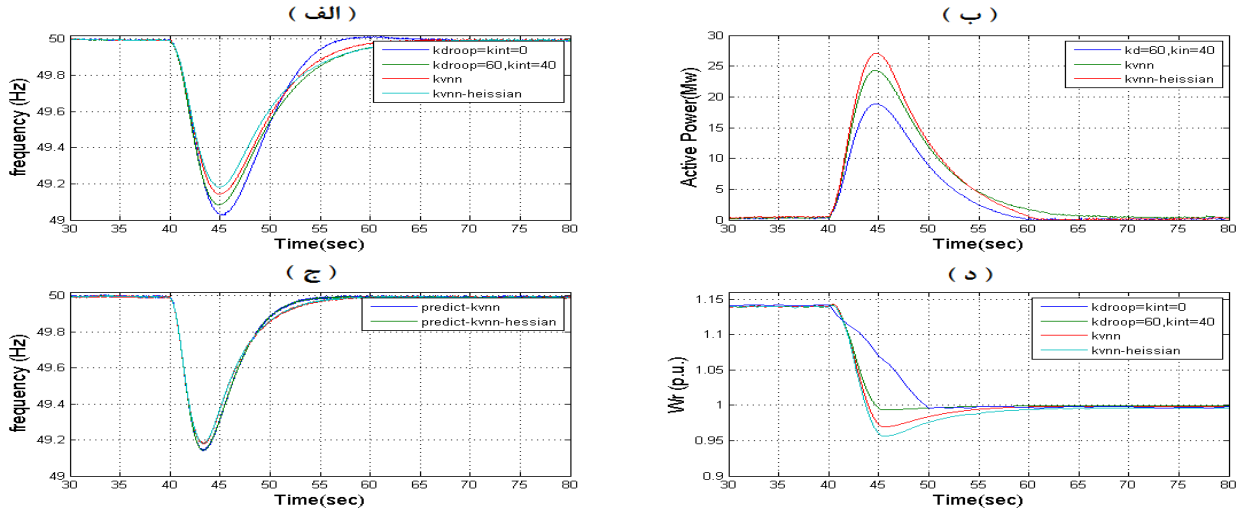
استفاده از روش های داده محور، روش کنترلی پیشنهادی عملکرد مناسب تری از ۳ حالت دیگر دارد.



شکل (۱۱): نتایج فرکانس شبکه برای حالت ۳ الف) فرکانس شبکه ب) توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس ج) سرعت رتور DFIG د) فرکانس تخمین زده شده به روش داده محور



شکل (۱۲): سرعت باد برای حالت ۴



شکل(۱۳): نتایج فرکانس شبکه برای حالت ۴ الف) فرکانس شبکه ب) توان اکتیو مرجع تولید شده توسط مدار کنترل فرکانس ج) سرعت رتور DFIG د) فرکانس تخمین زده شده به روش داده محور

جدول (۵): مقایسه فرکانس شبکه برای حالت ۴

	K_{droop}=۰ $K_{inertia}$=0	K_{droop}=۶0 $K_{inertia}$=۴0	KVVN Gradient	KVVN Hessian
FN(Hz)	49.02	49.08	49.14	49.18
Max (ROCOF)	-0.8۴1	-0.8۲۷	-0.۸۰۲	-0.۷۸۱

۷) نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید جهت تنظیم تطبیقی ضرایب حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی DFIG جهت بهبود فرکانس شبکه قدرت بیان شده است. همچنین برای فائق آمدن بر مشکلات مدل سازی از روش داده محور که فقط بر اساس ورودی و خروجی سیستم عمل می کند استفاده شده است. در این مقاله استفاده از روش KVNN که جهت افزایش سرعت و دقت در پیدا نمودن همسایه های مشابه از دو پارامتر اندازه و زاویه بین بردار ها استفاده می نماید، پیشنهاد شده است. همچنین در این مقاله یک فرمول بندی جدید جهت به روزرسانی ضرایب حلقه های کنترلی دروپ و اینرسی با استفاده از ماتریس هیسین خطا ارایه شده است.

از مزایای روش پیشنهادی می توان به استفاده از آن بدون نیاز به هیچ تحلیل اولیه ای از توربین های بادی و شبکه های قدرت اشاره کرد زیرا روش داده محور فقط از اطلاعات فرکانس شبکه و توان تزریقی کنترلر استفاده می کند. روش K-VNN برای تنظیم ضرایب مدار کنترل فرکانس با استفاده از بردارهای لحظات پیشین، فرکانس شبکه را برای لحظه بعد پیش بینی می نماید. مزیت مهم دیگر سیستم کنترلی ارایه شده، کاهش کمتر فرکانس شبکه به علت استفاده از ماتریس هیسین جهت تنظیم ضرایب مدار کنترلی فرکانس است.

برای بررسی تاثیر گذاری الگوریتم پیشنهادی بر عملکرد توربین بادی یک مزرع بادی DFIG با توان ۱۰۰ MW را با شش ژنراتور سنکرون با مجموع توان ۹۰۰ MW به بار استاتیکی متصل و عملکرد شبکه را در ۴ حالت مختلف شبیه سازی و مقایسه نمودیم. نتایج شبیه سازی بر مقاوم و موثر بودن روش کنترلی ارائه شده در حالت گذرا و دایمی و افزایش کمترین مقدار فرکانس شبکه به هنگام خارج شدن ژنراتورها و افزایش بار در حالت سرعت ثابت و متغیر باد دلالت دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت استفاده از اعتبار پژوهشی این دانشگاه اعلام می دارند.

پیوست:

۱) پارامترهای توربین گازی

T1	303K
T2	619.4K
T3	1324.74K
T4	805.07K
P1	1.013bar
P2	10.84bar
P2/P1	10.7
$\dot{m}f$	9.13kg/s
$\dot{m}a$	427kg/s
$\dot{W}net$	93.42Mw
Qv	46.774 kJ/kg

۲) پارامترهای توربین آبی

R2	0.04
K2	0.03
Tg	0.2
Tr	5
Rt	0.38
Rp	0.05
Tw	1

مراجع

[1] Global Wind Energy Council: “Global wind energy outlook 2012” November 2012.

[2]Mohammad Verij Kazemi, Ahmad Sadeghi Yazdankhah, Hossein Madadi Kojabadi. (2010) Direct power control of DFIG based on discrete space vector modulation. 35(5):1033-1042.

[3]محمد امین قاسمی، مصطفی پرنیانی تعیین پارامترهای موثر در کنترل فرکانس شبکه سراسری برق ایران از طریق پردازش و بهینه سازی داده‌های ثبت شده . مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران- ۱۳۹۶: (۳) ۹ : ۵۵-۶۸.

[4] روح الامینی مهدی، رشیدی نژاد مسعود. تدارک همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با در نظر گرفتن محدودیت گرفتگی خطوط. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران.۱۳۹۱ ; ۹(۲) : ۱-۱۰

[۵] I. A. Gowaid, A. EI-Zawawi, and M. EI-Gammal, “Improved inertia and frequency support from grid-

"Frequency control in autonomous power systems withhigh wind power penetration," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 2,pp. 189–199, Apr. 2012.

[20] Y. Wang, G. Delille, H. Bayem, X. Guillaud, and B. Francois, "Highwind power penetration in isolated power systems—Assessment of windinertial and primary frequency responses," IEEE Trans. Power Sys.,vol. 28, no. 3, pp. 2412–2420, Aug. 2013.

[21] F. D. Kanellos and N. D. Hatziargyriou, "Optimal control of variable speed wind turbines in islanded mode of operation," IEEE Trans. EnergyConvers., vol. 25, no. 4, pp. 1142–1151, Dec. 2010.

[22] M. Hwang, E. Muljadi, J. W. Park, P. Sorensen and Y. C. Kang, "Dynamic Droop–Based Inertial Control of a Doubly-Fed Induction Generator" IEEE Trans. Sustain. Energy, 7(3),924-933,2016.

[23] M. Hwang, E. Muljadi, G. Jang and Y. C. Kang, "Disturbance-Adaptive Short-Term Frequency Support of a DFIG Associated with the Variable Gain Based on the ROCOF and Rotor Speed" IEEE Trans. Power Sys., Volume: 32, Issue: 3, May 2017 , 1873 – 1881.

[24] T. Petru et al., "Modeling of wind turbines for power system studies,"IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 4, pp. 1132–1139, Nov. 2002.

[25] S. Ghosh and S. Kamalasadan and N. Senroy and J. Enslin. "Doubly Fed Induction Generator (DFIG)-Based Wind Farm Control Framework for Primary Frequency and Inertial Response Application," IEEE Transactions on Power Systems, v.31, 2016, p. 1861-1871.

[26] M. F. M. Arani and Y. A. R. I. Mohamed, "Analysis and Mitigation of Undesirable Impacts of Implementing Frequency Support Controllers in Wind Power Generation," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 1, pp. 174-186, March 2016.

[27] M. F. M. Arani and Y. A. R. I. Mohamed, "Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability," IEEE Trans. Power Systems, vol. 30, no. 1, pp. 385-396, 2015.

[28] Z. Hou and S. Jin, "Data driven model-free adaptive control for a classof MIMO nonlinear discrete-time systems," IEEE Trans. Neural Netw.,vol. 22, no. 12, pp. 2173–2188, Dec. 2011.

[29] Z. Gao, H. Saxen, and C. Gao, "Guest Editorial: Special section on data driven approaches for complex industrial systems," IEEE Trans. Ind.Informat., vol. 9, no. 4, pp. 2210–2212, Nov. 2013.

[30] Z. Hou and Y. Zhu, "Controller-dynamic-linearization-based model freeadaptive control for discrete-time nonlinear systems," IEEE Trans. Ind.Informat., vol. 9, no. 4, pp. 2301–2309, Nov. 2013.

[31] M.-B. Radac, R.-E.Precup, E. M. Petriu, S. Preitl, and C.-A.Dragos,"Data-driven reference trajectory tracking algorithm and experimentalvalidation," connected DFIG wind farms," in Proc. IEEE PES Power Syst. Conf. Expo., 2011, pp. 1–9.

[۶] Tsili, M., Papathanassiou, S.: 'A review of grid-code technicalrequirements for wind farms', IET Renew. Power Gener., 2009, 2, (3),pp. 308–332

[7] S. S. Guggilam, C. Zhao, E. Dall'Anese, Y. C. Chen, S. V. Dhople, "Optimizing power-frequency droop characteristics of distributed energy resources", IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 3, pp. 3076-3086, May 2018.

[8] M. Garmroodi, G. Verbic, and D. J. Hill, "Frequency support from wind turbine generators with a time-variable droop characteristic," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 2, pp. 676–684, 2018

[9] A. Teninge et al., "Contribution to frequency control through wind turbine inertial energy storage," IET Renew. Power Gener., vol. 3, no. 3, pp. 358–370, 2009.

[10] D. Boëda, A. Teninge, D. Roye, S. Bacha, and R. Belhomme, "Contributionof wind farms to frequency control and network stability," inProc. Eur. Wind Energy Conf. Exhib., Italy, 2007.

[11] A. Mitra, D. Chatterjee, "Active power control of DFIG-based wind farm for improvement of transient stability of power systems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 82-93, Jan. 2016.

[12] عبادی جعفر، جاویدی دشت بیاض محمدحسین. توسعه مدل حلقه کنترل بار فرکانس نیروگاه ها با در نظرگرفتن ضریب دمپینگ توربین. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران ۲۷-۱۹: (۲) ۹ ;. ۱۳۹۱

[13] K. V. Vidyanandan and N. Senroy, "Primary frequency regulation bydeloaded wind turbines using variable droop," IEEE Trans. Power Syst.,vol. 28, no. 2, pp. 837–846, May 2013.

[14] I. D. Margaris, S. A. Papathanassiou, and N. D. Hatziargyriou, "Frequencycontrol in autonomous power systems with high wind power penetration,"IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 2, pp. 189–199, Apr. 2012.

[15] Z. Peng, J. Wang, D. Bi, Y. Dai, Y. Wen, "The application of microgrids based on droop control with coupling compensation and inertia", IEEE Trans. Sustain. Energy. Volume: 9, Issue: 3, July 2018

[16] J. Morren, J. Pierik, and S. W. H. de Haan, "Inertial response of variablespeed wind turbines," Elect. Power Syst. Res., vol. 76, no. 11, pp. 980–987,Jul. 2006.

[17] N. Soni, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, "Improvement of transientresponse in microgrids using virtual inertia," IEEE Trans. Power Del.,vol. 28, no. 3, pp. 1830–1838, Jul. 2013.

[18] J. Morren, S. W. H. de Haan, W. L. Kling, and J. A. Ferreira, "Wind turbinesemulating inertia and supporting primary frequency control," IEEETrans. Power Syst., vol. 21, no. 1, pp. 433–434, Feb. 2006.

[19] I. D. Margaris, S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziargyriou, A. D. Hansen,and P. Sørensen,

IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 9, no. 4, pp. 2327–2336, Nov. 2013.

[32] G. Bontempi, M. Birattari, and H. Bersini, “Lazy learning for localmodeling and control design,” Int. J. Control, vol. 72, no. 7-8, pp. 643/658–643/658, 1999.

[33]P.Tianhong, Z.Tao, L.Shaoyuan” A Novel Hierarchical Searching Cluster Strategy for Lazy Learning” Proceedings of the 25th Chinese Control Conference, Heilongjiang, 7-11 August, 2006.

[34] Z. Shengqi, M. Yateendra, M. Shahidehpour, Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems, IEEE Trans. Power Syst. 31 (2) (2016) 1595–1603.

[35] F. Lu, Y. Huang, J. Huang, and X. Qiu, “A hybrid Kalman filtering approach based on federated framework for gas turbine engine health monitoring,” IEEE Access, vol. 6, pp. 9841–9853, 2018.

[36] Acakpovi, A., Hagan, E. Ben, & Fifatin, F. X. (2014). Review of Hydropower Plant Models. International Journal of Computer Applications, 108(18), 33–38.