تشخیص و گذر از خطا در سیستم قدرت دارای منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی

احسان اکبری*[۱]

*۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، akbari.ieee@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲

چکیده: وقوع خطا در میکروگریدهای دارای منابع مختلف همواره به عنوان یکی از چالش‌های مهم در پژوهش‌های مختلف بررسی شده است. نحوه تشخیص خطا و جبران سازی افت ولتاژ ناشی از وقوع خطا در این سیستم‌ها به منظور پایدار ماندن شبکه و عدم خسارت به سیستم قدرت به‌عنوان دو عامل مهم در این پژوهش‌ها مطرح می‌باشند. ساختار پیشنهادی این مقاله، یک سیستم ترکیبی بادی-خورشیدی-ذخیره‌ساز با قابلیت عبور از خطا می‌باشد که نوسانات توان خروجی و افت ولتاژ در سیستم را که به واسطه خطا ایجاد می‌گردد کاهش می‌دهد. در توپولوژی پیشنهادی، سیستم خورشیدی از طریق مبدل DC-DC به DFIG متصل می‌شود، به این ترتیب نیاز به اینورتر مخصوص برای سیستم خورشیدی را از بین برده و هزینه را کاهش می‌دهد. در این مقاله نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی شد. در زمان ۰,۳ ثانیه که افت ولتاژ ناگهانی صورت می‌گیرد، توان اکتیو کاهش پیدا می‌کند اما توان راکتیو به دلیل جبران‌سازی خطای ایجاد شده افزایش می‌یابد. با وقوع خطا و افت ناگهانی ولتاژ در سیستم، توربین بادی به حالت ناپایداری نرسیده و افزایش ناگهانی گشتاور رخ نداده است و سیستم کنترلی به خوبی عمل کرده است. بنابراین در این پژوهش، سیستم پیشنهادی به خوبی توانسته علاوه بر تشخیص خطا، جبران‌سازی افت ولتاژ را از طریق تثبیت ولتاژ لینک DC و تزریق توان راکتیو به منظور بهبود افت ولتاژ انجام دهد. لازم به ذکر می‌باشد که کلیه شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب/ سیمولینک انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: تشخیص و گذر از خطا، منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی.

۱- مقدمه

افزایش روز افزون منابع تولید برق تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی و مزارع بادی به علت کاهش آلودگی و هم چنین کاهش هزینه تولید نسبت به روش‌های گذشته، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، ادغام موفقیت‌آمیز این منابع در شبکه، یک مسئله چالش برانگیز به شمار می‌آید. اتخاذ توپولوژی ترکیبی انرژی تجدیدپذیر مانند تلفیق انرژی بادی و خورشیدی، می‌تواند به‌طور بالقوه نوسانات توان را کاهش دهد و قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها را افزایش دهد. همبستگی بین الگوهای تابش خورشید و سرعت باد، ادغام منابع خورشیدی و باد را به یک راه‌حل کارآمدتر و اقتصادی‌تر تبدیل می‌کند، زیرا باد و خورشید می‌توانند مکمل یکدیگر باشند. از طرف دیگر، کیفیت توان تحت اختلالات ولتاژ شبکه، کاهش مشکلات پایداری شبکه به دلیل نفوذ گسترده سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و قابلیت‌های پیشرفته تحت خطاهای شبکه (قابلیت عبور از ولتاژ پایین) برخی از نیازهای واقعی شبکه هستند. در نتیجه، الگوریتم‌های کنترلی باید در نظر گرفته شود تا پاسخگوی این نوع ویژگی‌ها باشند. همچنین روش‌های مدیریت انرژی به کار گرفته شده در این شبکه‌ها مخصوصاً تحت شرایط خطا اهمیت بسیاری دارد. با افزایش اهمیت این منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت، مدیریت انرژی تحت شرایط خطا در این شبکه‌ها نیز اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. به این ترتیب، نیاز است تا به منظور جلوگیری از خاموشی شبکه و به وجود آمدن آسیب‌های اقتصادی ناشی از وقوع خطا، مدیریت انرژی و طرح‌های عبور از خطا به‌خوبی در این شبکه‌ها انجام گیرد. سامانه هیبریدی انرژی‌های تجدیدپذیر بادی-فوتوولتاییک که متشکل از ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم[۱] و آرایه‌های فتوولتائیک است، در حال تبدیل شدن به منبعی مقرون به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

صرفه برای تأمین توان الکتریکی در نواحی جزیره‌ای از شبکه برق است. اما نفوذپذیری تجدیدپذیرها در سیستم قدرت، آن را در برابر خطاهای گذرای ولتاژی آسیب‌پذیر ساخته و این امر در آینده پایداری شبکه‌های اشباع شده از اینورترها را تضعیف می‌کند. برای حل این معضل در [۱]، طرح کنترلی هماهنگ‌ساز گذر ولتاژ پایینی برای سامانه هیبریدی انرژی‌های تجدیدپذیر بادی-فوتوولتاییک پیشنهاد شده است. این طرح کنترلی برای به‌کارگیری عدم تعادل توان بین شبکه دارای خطا و منابع تولید توان تجدیدپذیر از بیشینه اینرسی انرژی سامانه هیبریدی انرژی‌های تجدیدپذیر بهره می‌گیرد. در [۲] برای کنترل توان حقیقی و راکتیو حین بروز خطاها در شبکه، استراتژی گذر از خطای هوشمندی را برای سیستم‌های تبدیل توان باد مبتنی بر ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه ارائه شده و رفتار گذرای سیستم تحت شرایط عادی و شرایط خطا بررسی شده است. در [۳]استراتژی برای گذر از خطا در شرایط اتصال کوتاه حلقه داخلی استاتور برای توربین‌های بادی دارای ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه پیشنهاد شده است. در این مرجع کاهش دمای اضافی ناشی از خطای اتصال کوتاه حلقه داخلی استاتور با تغییر سرعت گردش و توان حاصل شده است. این استراتژی نه تنها از توربین بادی دارای خطا محافظت می‌کند، بلکه تا جای ممکن تلفات توان را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، دیگر نیازی به محاسبه میزان توان مورد نیاز برای تنظیم کاهشی نیست. انجام فرآیند برآورد سطح خطا نیز ضرورتی ندارد. مرجع [۴]، در دو حوزه دستاوردهایی به دست آورده است. اول طرحی را برای انتخاب مقاومت نقطه خنثی پیشنهاد می‌کند که همان تحلیل اثرات روی عملکردهای حفاظتی به وسیله مشخصه‌های خطای زمین تک فاز سیستم جمع‌آوری نیروگاه فتوولتائیک در محیط‌های تست مختلف و سپس کمی‌سازی سرعت و قابلیت گزینشی عملکرد حفاظتی جریان توالی صفر مطابق با شاخص‌های ارزیابی، مطابق نیاز هماهنگی بین عملکردهای حفاظتی و گذر ولتاژ پایین و هماهنگی بین عملکردهای حفاظتی خطوط اتصال و خطوط کلکتور سیستم جمع‌آوری و در نهایت انتخاب مقاومت نقطه خنثی بر اساس شاخص‌ها است. دوم اینکه این مرجع استراتژی کنترلی جامعی را برای نیروگاه‌های مقیاس بزرگ فتوولتائیک پیشنهاد می‌دهد که می‌تواند به طور مؤثر شاخص‌های ارزیابی ذکر شده در بالا برای حفاظت تحت سناریوهای مختلف تولید توان اکتیو را بهبود دهد. مرجع [۵] پیکربندی جدیدی را برای مبدل منبع ولتاژ-فشار قوی جریان مستقیم معرفی کرده است که چالش‌های ذکر شده در بالا را با تکیه بر رابط‌های شبکه شنت و سری به ترتیب در طول حالت پایدار و خطاها، با حذف قطع‌کننده DC[۲]، کاهش می‌دهد. در [۶] یک طرح جدید SVC که برای مزرعه بادی و همچنین توربین‌های بادی مجزا بدون استفاده از مبدل منبع ولتاژ اضافی و ترانسفورماتور سری قابل استفاده است، پیشنهاد شده است. مرجع [۷] مطالعه‌ای به هدف جلوگیری از رشد جریان خطای کل سیستم در طول عملیات گذر از خطای ریزشبکه‌ها ارائه داده است. برای مقابله با این چالش، یک استراتژی محدودسازی سلسله مراتبی جریان خطا (FCHL)[۳] برای عبور از خطای ریزشبکه‌ها با عملکردی برای خنثی کردن اثر جریان خطای ریزشبکه بر جریان خطای کل پیشنهاد شده است. مرجع [۸] به طراحی و تجزیه و تحلیل یک طرح کنترل عبور از خطا برای یک توربین بادی مبتنی بر DFIG پرداخته است. یک کنترل حالت لغزشی پایانه انتگرال مرتبه دوم فازی (FSOITSMC)[۴] جدید برای مبدل‌های روتور و سمت شبکه طراحی شده است. در [۹] یک طرح کنترل عبور از خطای جدید برای اینورترهای PV پیشنهاد شده که قادر به انجام پشتیبانی شبکه دینامیکی از طریق تزریق توان راکتیو تحت خطاهای شبکه نامتعادل می‌باشد. مرجع [۱۰] یک استراتژی کنترل کارآمد را برای بهبود قابلیت عبور از خطای ژنراتور بادی DFIG در طول خطاهای شبکه متقارن و نامتقارن پیشنهاد می‌کند. طرح پیشنهادی متشکل از جبران‌کننده‌های عبور از خطای اکتیو و پسیو است. جبران‌کننده اکتیو با تعیین مراجع جریان روتور برای کاهش ولتاژ روتور عمل می‌کند. جبران‌کننده پسیو مبتنی بر محدودکننده جریان روتور است که به طور قابل توجهی جریان‌های هجومی روتور را در لحظه وقوع آن کاهش می‌دهد و خطاهای شبکه با افتادگی‌های زیاد را برطرف می‌کند. مرجع [۱۱] یک محدودکننده جریان خطای هیبرید (محدودکننده جریان خطای ابررسانای با دمای بالا (HTS)[۵] و مقاومت نگه‌دارنده سری) را پیشنهاد می‌کند که با بریکر DC مکانیکی یکپارچه شده است تا قابلیت عبور خطای DC شبکه DC چند ترمیناله مش شده را افزایش دهد و از افزایش نفوذ منابع تولید انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۰ و اتصال شبکه‌های AC منطقه‌ای پشتیبانی کند. مرجع [۱۲] یک استراتژی کنترل مقاومت نگه‌دارنده دینامیکی سری مدوله شده (MSDBR)[۶] را برای افزایش قابلیت عبور از خطای توربین‌های بادی DFIG ارائه کرده است. طرح حفاظتی مقرون به صرفه پیشنهادی، یک تقویت‌کننده ولتاژی را معرفی می‌کند که قابلیت جبران ولتاژ سری را ارائه می‌دهد و ابزاری برای تخلیه توان برای کاهش عدم تعادل توان را در طول خطاهای شبکه فراهم می‌کند. مرجع [۱۳] توپولوژی‌های رابط شبکه سری را برای افزایش عملکرد عبور از خطا توربین‌های بادی DFIG ارائه داده است. مرجع [۱۴] به بررسی کامل خطاها و راهبردهای خطا برای سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه می‌پردازد. در این مقاله، یک بررسی عمیق در مورد جنبه‌های علمی مختلف گسل‌ها و استراتژی‌های قابلیت عبور خطا موجود در ادبیات انجام شده است. مرجع [۱۵] یک طرح خطا را برای سیستم‌های انرژی باد مبتنی بر ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه پیشنهاد می‌کند. مرجع [۱۶]، با توجه به تحلیل استراتژی کنترل پایه سیستم انتقال ولتاژ بالا هیبریدی و ویژگی‌های شبکه‌های غیرفعال، یک استراتژی کنترل هماهنگ شده از طریق خطای AC ارائه شده است. به منظور حل مشکل وقفه انتقال توان DC ناشی از خطای AC در انتهای ارسال، یک استراتژی کنترل هماهنگ از طریق خطا بر اساس کنترل ولتاژ بازوی MMC پیشنهاد شده است. مرجع [۱۷] یک الگوریتم کنترل جدید مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

مجموعه کنترل محدود برای کنترل اینورتر مستقل در حالت‌های عادی و عبور از خطا بدون هیچ‌گونه خرابی پیشنهاد می‌کند.

مطابق مطالب بیان شده در مراجع اشاره شده در این مقاله، در پاسخ به رخداد خطا در شبکه، افت ولتاژ شدیدی در ترمینال‌های ژنراتور پدیدار می‌شود که ممکن است بیش از مدت خطا به طول بینجامد و جریان استاتور ناگهان افزایش یافته و از حد مجازش فراتر می‌رود. بنابراین جریان روتور نیز به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و ولتاژ لینک DC را زیاد می‌کند که ممکن است به مبدل آسیب جدی وارد نماید. به علاوه، گشتاور الکترومغناطیسی در حین خطا، نوسان می‌کند که روی توربین تنش وارد می‌کند. بنابراین سیستم حفاظتی ژنراتور دو سو تغذیه DFIG عمل کرده و توربین را از شبکه جدا می‌کند. برای جلوگیری از آثار نامطلوب قطع توربین بادی، استانداردهای شبکه در کشورهایی که بخش زیادی از انرژی‌شان از توربین بادی تأمین می‌شود، الزام کرده‌اند که تمام توربین‌های تازه نصب باید توانایی (FRT)[۷] را دارا باشند[۱۸]. این بدان معناست که تمام نیروگاه‌ها، از جمله نیروگاه‌های بادی، باید توانایی متصل ماندن به شبکه را در حین خطا یا شرایط ولتاژ پایین در یک محدوده‌ی مشخص داشته باشند. به علاوه، ژنراتورهای بادی باید در حین خطا توانایی این را داشته باشند که (برای حمایت از ولتاژ در نقطه اتصال توربین به شبکه) توان راکتیو به شبکه تزریق کنند و سریعاً پس از برطرف شدن خطا، تولید توان اکتیو را از سر بگیرند[۱۹]. همین مسئله ضرورت تشخیص و گذر از خطا در سیستم قدرت دارای منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی را مشخص می‌کند. ادامه مقاله به شرح زیر است:

در بخش ۲، قابلیت گذر از خطا معرفی می‌شود. در بخش ۳، ساختار سیستم هیبرید مورد مطالعه بیان می‌شود. در بخش ۴، ساختار سیستم کنترل کننده معرفی شده و روش‌های کنترلی جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور و کنترل مبدل DC/DC اعمال می‌شوند. در بخش ۵، مکانیسم تشخیص خطا در سیستم مورد مطالعه معرفی می‌گردد. در بخش ۶، نتایج شبیه‌سازی آورده شده و در نهایت مقاله در بخش ۷ جمع‌بندی می‌گردد.

۲- قابلیت گذر از خطا

با اینکه توربین بادی مجهز به DFIG دارای چندین مزیت است، با دو مشکل عمده مواجه است.

حساسیت به اختلال ولتاژ: بسیار حساس به اختلالات ولتاژ به‌خصوص افت ولتاژ می‌باشد. اگر هر خطایی در شبکه رخ دهد، یک اختلال ولتاژ بسیار بزرگ که منجر به جریان غیر قابل‌کنترل در مبدل سمت روتور که منجر به آسیب دیدن سوئیچ‌های الکترونیک قدرت می‌شود وجود خواهد داشت.

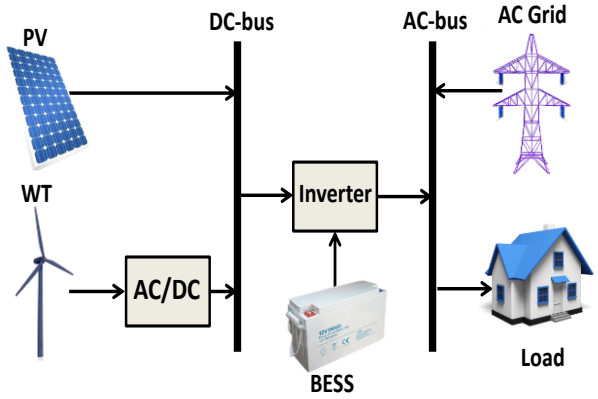
حساسیت به نوسانات برق خروجی: DFIG از نوسانات برق خروجی رنج می‌برد برای محافظت از مدار روتور در شرایط خطا، معمولاً توربین بادی DFIG قطع شده و تا رفع خطا غیرفعال باقی می‌ماند که به نوبه خود باعث کاهش بهره‌وری عملیاتی خواهد شد. بنابراین برای اینکه توربین‌های بادی در طول خطا به شبکه متصل باقی بمانند، فن‌آوری‌های مختلفی جهت مقاومت در برابر افت ولتاژ توسعه یافته‌اند. این قابلیت تحمل DFIG در برابر افت ولتاژ قابلیت گذر از خطای ولتاژپایین (LVRT) و یا قابلیت گذر از خطا (FRT) نامیده می‌شود. رویکرد قابلیت گذر از خطا (گذر از ولتاژ پایین) را می‌توان به‌طور عمده به دو دسته تقسیم کرد[۲۰]:

الف) روش PASSIVE: آن‌ها ازاجزای اضافی استفاده می‌کنند مانند crow bar، کنترل زاویه پره، سیستم خازن انرژی، مدار ذخیره انرژی باس‌DC. این یک روش مرسوم مورد استفاده می‌باشد که در آن از یک مقاومت یمتصل به شبکه استفاده می‌شود برای جریان‌های بالای روتور و یا ولتاژ بالای لینک dc که در این حالت مبدل سمت روتور (RSC) غیرفعال است[۲۱].

ب) روشActive: شامل چندین کنترل مبدل با استراتژی‌های کنترل مبدل سمت روتور، تأثیر خطا در توربین بادی DFIG می‌تواند کنترل می‌شود. ردیابی ماکزیم می‌توان در همه توربین‌های بادی سرعت متغیر به منظور افزایش راندمان مبدل قدرت استفاده می‌شود. بنابراین، مبدل‌های مورد استفاده درتوربین‌های بادی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که آن‌ها باید به حداکثر قدرت ممکن تولیدی قبل از رسیدن به شرایط قطع سرعت باد برسند.

۳- ساختار سیستم هیبرید مورد استفاده

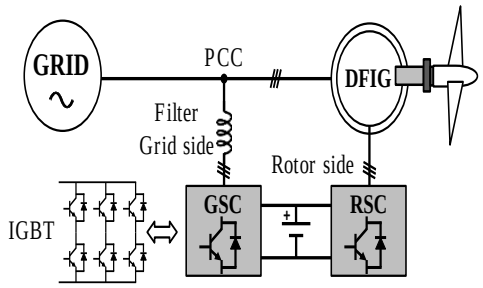
شکل (۱) ساختار شبکه شامل نیروگاه خورشیدی، بادی، دیزل ژنراتور و سیستم ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد که در این مقاله مدنظر می‌باشد[۲۲].



شکل (۱): ساختار سیستم تولید برق هیبریدی مورد استفاده در مقاله [۲۲]

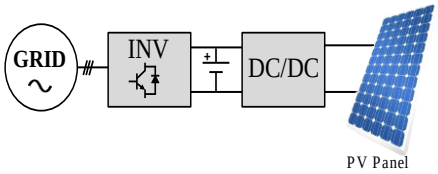
ساختار معمول توربین‌های بادی DFIG در شکل (۲) نشان داده شده ا ست. مبدل پشت به پشت شامل مبدل سمت روتور (RSC)[۸] و یک مبدل سمت شبکه (GSC)[۹] در این ساختار استفاده شده است[۲۳].

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



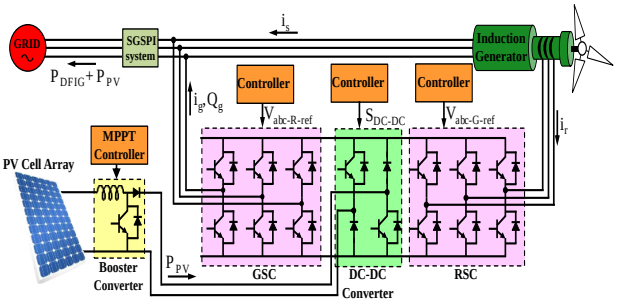
شکل(۲): ساختار متداول از توربین بادیDFIG

شکل۳ پیکربندی معمول سیستم PV متصل به شبکه را نشان می‌دهد. در این پیکربندی، یک مبدل DC-DC وجود دارد که با استفاده از سیستم ردیابی حداکثر نقطه توان، توان سیستمPV کنترل می‌شود. علاوه بر این، در این ساختار یک اینورتر DC-AC برای اتصال سیستم به شبکه AC استفاده می‌شود[۲۳].



شکل(۳): ساختار متداول سیستمPVمتصل به شبکه

در این مقاله مطابق شکل (۳) برای ترکیب این پیکربندی، اینورتر مربوط به سیستم PV حذف و خروجی مبدل DC-DC به‌طور مستقیم به لینک DC مبدل پشت به پشت در سیستم DFIG متصل شده است. مزیت سیستم هیبریدی پیشنهادی، کاهش هزینه می‌باشد که به دلیل حذف بخش اینورتر است. در واقع سیستم پیشنهادی یک سیستم کم هزینه و بسیار رقابتی در بازار انرژی‌های تجدید پذیر، به‌ویژه در مناطق روستایی است. ایده اصلی این روش استفاده از توان خروجی برای تخمین توان ورودی است. در عمل، توانGSC و RSC را می‌توان جهت برآورد توانPV با توجه به تعادل لینک DC در سیستم ترکیبی استفاده کرد. با استفاده از تعداد مبدل‌های قدرت کمتر مورد نیاز و تعداد سنسورکمتر مورد نیاز هزینه سیستم ترکیبی بسیار ارزان‌تر است. مبدل پشت به پشت می‌تواند توان DC لینک سیستمPVرا پشتیبانی و بدون اینورتر پایدار نگه دارد. از این‌رو، سیستمPV می‌توانید بدون در نظر گرفتن تغییرات تابش تولید حداکثر توانرا بدون اطلاعات توانPV ارائه دهد. سیستم پیشنهادی مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است[۲۴].



شکل (۴): ساختار سیستم ترکیبی بادی- خورشیدی پیشنهادی

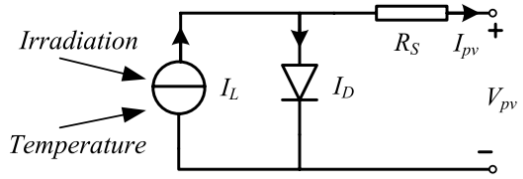
در این ساختار، خروجیDC مبدلDC-DC به‌طور مستقیم به لینکDC مبدل پشت به پشت متصل می‌شود. بنابراین، اینورتر سیستمPV حذف شده است که می‌تواند هزینه کل سیستم را کاهش دهد. در این پژوهش، مبدل DC-DC از نوع باک-بوست است که بسیار پایدار و سریع عمل می‌کند. نحوه عملکرد سیستم بدین گونه می‌باشد که مبدل باک بوست می‌تواند تولید توان حداکثر از سیستمPV را حفظ کند و این حداکثر توان به ولتاژ لینک DC ارائه می‌شود. در ادامه RSC و GSC توانDC را به توانAC تبدیل می‌کنند. برای طراحی سیستم پیشنهادی ابتدا لازم است مدل‌های ریاضی مربوط به دو بخش بادی و خورشیدی ارائه شود که در ادامه به تفکیک مدل‌سازی صورت می‌گیرد.

۳-۱- سیستم خورشیدی

مدار معادل یک ماژول خورشیدی در شکل (۵) نشان داده شده است. این مدار شامل یک منبع جریان موازی با یک دیود است. رابطه ریاضی بین جریانPV و ولتاژ به‌صورت زیر می‌باشد:

$$I_{pv} = I_L - I_D\left[\exp\left(\frac{qV_{pv}+qIR_s}{AKT}\right)-1\right] \qquad (۱)$$

که در آن I_{PV} و V_{PV} به ترتیب جریان و ولتاژ PV، I_D جریان اشباع دیود، q بار الکترون، A ضریب مواد دیود است، K ثابت بولتزمن، R_S مقاومت سری و T دمای مطلق است[۲۵].



شکل (۵): مدار معادل PV مورد استفاده در مقاله

۳-۲- مدل‌سازی DFIG

یکی از تفاوت‌های اساسی مدل دینامیکی ژنراتور DFIG با ژنراتورسنکرون، مدل مکانیکی آن است. همان‌گونه که اشاره شد در این ژنراتور به دلیل وجود مبدل سرعت مکانیکی بین توربین و ژنراتور (گیربکس)، لازم است از مدل دو محوری برای بیان رفتار دینامیک محور روتور استفاده شود[۲۵]. بر خلاف ژنراتور سنکرون که در آن تنها معادله تاب ژنراتور، مبین رفتار مکانیکی آن است، در اینجا چهار معادله شامل سه معادله دیفرانسیل و یک معادله جبری، رفتار مکانیکی محور ژنراتور را مدل می‌کنند.

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t}(T_m - T_{sh}) = \frac{1}{2H_t}\left(\frac{p_m}{\omega_t} - T_{sh}\right)$$
$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{2H_g}(T_{sh} - T_e) \qquad (۲)$$
$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s(\omega_t - \omega_g)$$
$$T_{sh} = k\theta + c.\omega_s(\omega_t - \omega_g)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

در روابط فوق Pm توان مکانیکی تولیدی توسط باد، ωs سرعت سنکرون و Ht و H_g به ترتیب ثابت‌های اینرسی توربین و ژنراتور می‌باشند. همچنین T گشتاور می‌باشد. مدل الکتریکی ژنراتورDFIG مشابه سایر ماشین‌های الکتریکی درقاب مرجع dq بیان می‌شود. ولتاژهای استاتور در قاب مرجع dq به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$V_{qs} = -r_s i_{qs} + \omega_s(\psi_{ds}) + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}\psi_{qs}$$
$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - \omega_s(\psi_{qs}) + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}\psi_{ds} \quad (۳)$$

حال مطابق فوق برای ولتاژهای بخش روتور در قاب مرجع dq می‌توان روابط زیر را بیان کرد:

$$V_{qr} = -r_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r)(\psi_{dr}) + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}\psi_{qr}$$
$$V_{dr} = -r_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r)(\psi_{qr}) + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}\psi_{dr} \quad (۴)$$

در روابط فوق V، R، i و ψ به ترتیب نمایانگر ولتاژ، مقاومت، جریان و شار هستند. همچنین توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور توسط روابط زیر قابل‌محاسبه می‌باشد:

$$P_{wg} = V_{qs}.i_{qs} + V_{qr}.i_{qr} + V_{dr}.i_{dr}$$
$$Q_{wg} = V_{qs}.i_{ds} - V_{qs}.i_{qs} + V_{qr}.i_{dr} - V_{dr}.i_{dr} \quad (۵)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، معادلات دیفرانسیل مبین رفتار دینامیک ماشین شامل سه معادله مکانیکی و چهار معادله الکتریکی است[۲۵].

۴- ساختار سیستم کنترل کننده

۴-۱- حلقه های کنترلی جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور

برای محا سبه توان‌های اکتیو و راکتیو ا ستاتور می‌توان از دو رابطه زیر استفاده کرد که عبارتند از:

$$P_S = -\frac{3}{2}\frac{L_m}{L_S}|V_S|\,i_{qr} \quad (۶)$$
$$Q_S = \frac{3}{2}\frac{L_m}{L_S}|V_S|\,(|i_{ms}| - i_{dr}) \quad (۷)$$

بنابراین با توجه به روابط (۶) و (۷) توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به صورت مستقل قابل‌کنترل هستند. به عبارت دیگر یکی از طریق مؤلفه‌ی جریان q و دیگری از طریق مؤلفه‌ی جریان d قابل کنترل هستند. بنابراین برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو ابتدا مؤلفه‌های جریان روتور باید جداسازی شوند. اما با توجه به اینکه هدف اصلی کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو از طریق تزریق ولتاژ روتور می‌باشد؛ بنابراین باید به نحوی روابط مؤلفه‌های جریان روتور با مؤلفه‌های ولتاژ روتور مشخص شود برای مؤلفه‌های شار روتور داریم. برای مؤلفه d ولتاژ روتور رابطه زیر را داریم:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma\frac{di_{dr}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_s}(\frac{di_{ms}}{dt}) - \omega_{sl}L_r' i_{qr} \quad (۸)$$

مؤلفه ولتاژ d روتور خود شامل دو مؤلفه می‌باشد، یک مؤلفه شامل فیدبک از مؤلفه d جریان روتور می‌باشد و مؤلفه دیگر شامل فیدفوروارد از مؤلفه q جریان روتور است.

$$R_r i_{dr} + \sigma\frac{di_{dr}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_s}(\frac{di_{ms}}{dt}) = \hat{V}_{dr}$$
$$-\omega_{sl}L_r' i_{qr} = V_{fdr} \quad (۹)$$

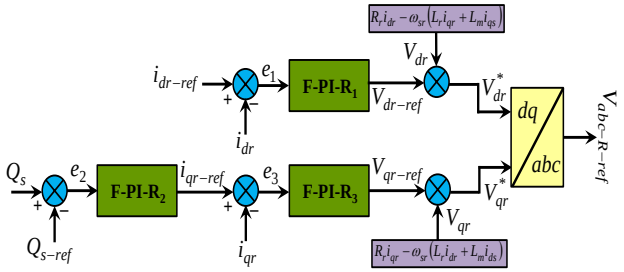
همچنین برای مؤلفه‌ی q ولتاژ روتور داریم:

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r\frac{di_{qr}}{dt} + \omega_{sl}(\frac{L_m^2}{L_s}(|i_{ms}| + L_r' i_{dr})) \quad (۱۰)$$

مؤلفه ولتاژ q روتور با توجه به رابطه (۱۰) خود شامل دو مؤلفه می‌باشد، یک مؤلفه شامل فیدبک از مؤلفه q جریان روتور می‌باشد و مؤلفه دیگر شامل فیدفوروارد از مؤلفه d جریان روتور است.

$$R_r i_{qr} + \sigma L_r\frac{di_{qr}}{dt} = \hat{V}_{qr}$$
$$\omega_{sl}(\frac{L_m^2}{L_s}(|i_{ms}| + L_r' i_{dr})) = V_{fqr} \quad (۱۱)$$

مدار کنترل مربوط به مبدل بخش روتور به صورت شکل (۶) می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ابتدا توان اکتیو و راکتیو مربوط به استاتور DFIG محاسبه می‌شود و سپس این مقادیر با مقادیر توان اکتیو و راکتیو مرجع می‌شود و با توجه به کنترل‌کننده PI مقادیر جریان‌های محورهای d و q مرجع محاسبه می‌گردند. در ادامه این مقادیر جریان‌های قاب مرجع d-q با مقادیر جریان‌های d-q مربوط به DFIG که قبلاً محاسبه شده است مقایسه شده و وارد کنترل‌کننده PI شده و در نهایت مقادیر مناسب ولتاژهای V_q و V_d محاسبه می‌شود.

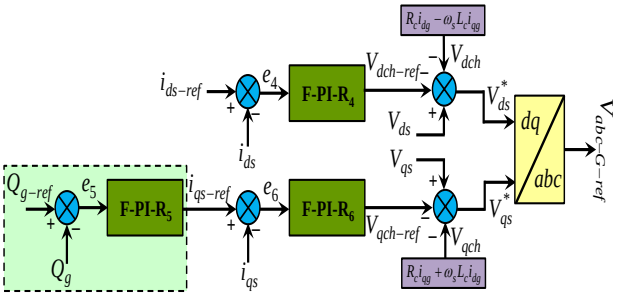


شکل (۶): مدار کنترل مربوط به مبدل سمت روتور (RSC)

وظیفه اصلی مبدل سمت رتور، کنترل توان خروجی و ولتاژ پایانه DFIG است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این حلقه به ترتیب شامل دو حلقه داخلی و بیرونی است. حلقه داخلی برای جریان و حلقه‌های بیرونی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو است. توان اکتیو می‌تواند توسط V_{qr} و توان راکتیو بوسیله V_{dr} کنترل می‌شود. مدار کنترل مربوط به مبدل بخش شبکه کاملاً شبیه کنترل مبدل بخش روتور می‌باشد. یعنی ابتدا توان اکتیو و راکتیو مربوط به روتور DFIG محاسبه می‌شود

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

و سپس این مقادیر با مقادیر توان اکتیو و راکتیو مرجع می‌شود و با توجه به کنترل‌کننده PI مقادیر جریان‌های محورهای d و q مرجع محاسبه می‌گردند. در ادامه این مقادیر جریان‌های قاب مرجع d-q با مقادیر جریان‌های d-q مربوط به DFIG که قبلاً محاسبه شده است مقایسه شده و وارد کنترل‌کنندهPI شده مقادیر مناسب ولتاژهای V_q و V_d محاسبه می‌شود و در انتها با توجه به روش مدولاسیون PWM سوئیچ زنی صورت می‌گیرد[۲۴].

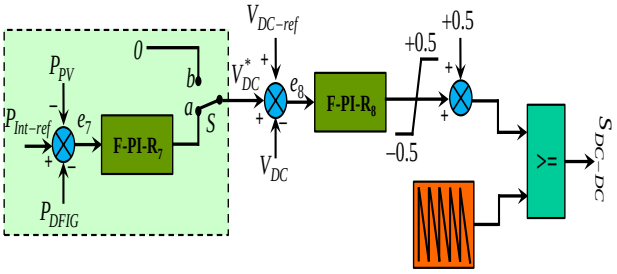


شکل (۷): مدار کنترل مربوط به مبدل سمت شبکه (GSC)

به‌طور کلی می‌توان گفت که مهم‌ترین وظیفه مبدل سمت شبکه، کنترل ولتاژ لینک DC سمت شبکه است. اندازه ثابت ولتاژ لینک DC می‌تواند ولتاژ خروجی مبدل را به آن اندازه‌ای که مورد نظر است تبدیل کند. بنابراین، حفظ اندازه ولتاژ مناسب و کم ریپل می‌تواند خروجی مبدل را هموارتر و کم هارمونیک تر نماید.

۲-۴- کنترل مبدل DC-DC

در ساختار پیشنهادی، آرایه‌های سلول PV از طریق یک مبدل DC-DC به لینک DC ژنراتور دو سو تغذیه متصل می‌شوند که برای کنترل ولتاژ DC در هنگام خطاهای شبکه و تنظیم توان اکتیو DFIG و PV در شرایط عملیاتی عادی استفاده می‌شود. ساختار کنترل کننده DC-DC پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده است.

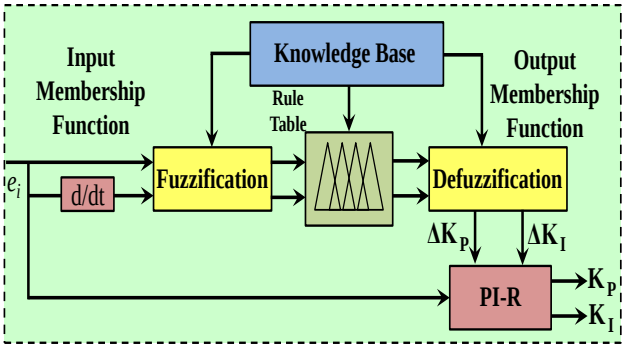


شکل (۸): شماتیک بخش کنترل مبدلDC-DC

در شرایط عادی،PI-R7 برای صاف کردن نوسانات توان خروجی و تولید ولتاژ مرجع برای لینک DC اعمال می‌شود. سیگنال ورودی برای F-PI-R7از اختلاف بین توان اکتیو سیستم یکپارچه PV - DFIG و مقدار مرجع توان اکتیو به دست می‌آید و سیگنال خروجی F-PI-R7 به ولتاژ مرجع لینک DC اضافه می‌شود و با ولتاژ واقعی لینک DC مقایسه می‌شود و در نتیجه سیگنال ورودی F-PI-R8 تولید می‌شود. خروجی F-PI-R8 نشان دهنده چرخه کاری است که به ۰/۵ اضافه می‌شود تا به یک چرخه کاری بین ۰ و ۱ برسد.

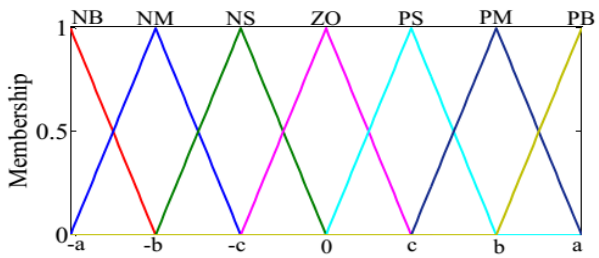
۵- مکانیسم تشخیص خطا در سیستم هیبرید

مکانیسم تشخیص خطا برای تعیین وضعیت سیگنال سوئیچ S مورد مطالعه قرار گرفت. در این شرایط، VDC^* صفر می‌شود (F-PI-R7 غیرفعال است) و PI-R8 باید ولتاژ لینک DC را کنترل کند. شایان ذکر است که وقتی سیگنال ورودی F-PI-R7 مثبت است، کنترل کننده DC-DC انرژی را از PV به لینک DC منتقل می‌کند، در نتیجه ولتاژ لینک DC را افزایش می‌دهد. بنابراین، کنترل کننده GSC ولتاژ لینک DC را با تبادل انرژی ازلینک DC به سیستم کاهش می‌دهد. برای محاسبه ضرایب کنترل کننده تناسبی از روش فازی استفاده می‌گردد. راهبردهای مدیریت انرژی که بر مبنای توان درخواستی و وضعیت شارژ منبع تغذیه کار می‌کنند، می‌توانند توسط روش‌های کنترل فازی به نحو موثری توسعه داده شوند. مجموعه قواعد فازی در نظر گرفته شده برای این کنترل کننده در جدول (۱) و (۲) آورده شده است. سیستم کنترل فازی استفاده شده در این پژوهش متشکل از موتور استنتاج ممدانی، فازی ساز تکین و غیر فازی ساز مرکز ثقل است. تنظیم دقیق ضرایب کنترل‌کننده تناسبی برای بهبود عملکرد سیستم و کنترل دقیق‌تر آن بسیار مهم می‌باشد. به همین دلیل در این مقاله با استفاده از الگوریتم فازی تنظیم دقیق این ضرایب صورت می‌گیرد. شکل (۹) نحوه محاسبه پارامترهای کنترل‌کننده‌های تناسبی با استفاده از روش فازی در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل (۹): نحوه محاسبه پارامترهای کنترل کننده های تناسبی با استفاده از روش فازی

لازم به ذکر می‌باشد که مقادیر ماکزیمم و مینیمم ضرایب K_p و K_i نقش نرمالیزه کردن ضرایب نهایی را دارند. در واقع با این کار مقادیر ضرایب مقداری بین صفر و یک خواهند داشت. توابع عضویت مربوط به سیستم فازی به صورت شکل (۱۰) می‌باشد[۲۴].



شکل (۱۰): توابع عضویت سیستم فازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

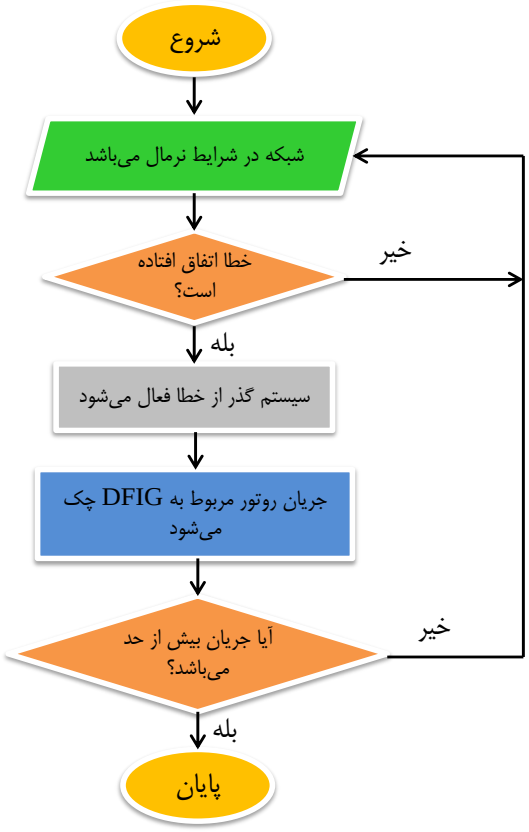
جدول (۱): قوانین فازی به منظور تنظیم ضریب K_p

		e'(t)						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(t)	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

جدول (۲): قوانین فازی به منظور تنظیم ضریب K_i

		e'(t)						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(t)	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

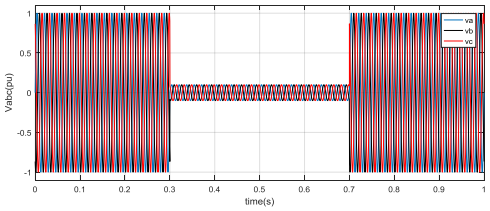
در جداول فوق، S نشان‌دهنده مقدار کم و B نشان‌دهنده مقدار زیاد می‌باشد. شکل (۱۱) فلوچارت حل مسئله پیشنهادی را نشان می‌دهد.



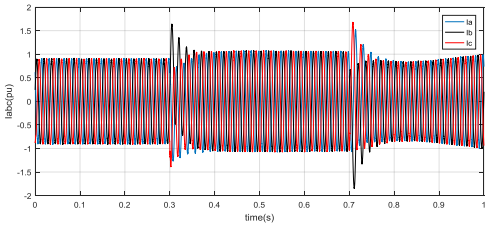
شکل (۱۱): فلوچارت حل مسئله پیشنهادی

۶- نتایج شبیه‌سازی

ساختار ارائه شده در شکل (۱) در نرم‌افزار سیمولینک/ متلب شبیه‌سازی شد که میکروگرید شامل یک نیروگاه بادی از نوع DFIG، سیستم خورشیدی، دیزل ژنراتور و ذخیره‌سازی می‌باشد که توسط مبدل‌های مختلف به یکدیگر متصل شده‌اند. در این بخش یک افت ولتاژ ۹۰ درصد ناگهانی از ثانیه ۰/۳ تا ۰/۷ در سیستم (در بخش استاتور سیستم DFIG) صورت می‌گیرد. شکل (۱۲)-الف منحنی ولتاژ و شکل (۱۲)-ب منحنی جریان بر حسب پریونیت در این حالت را نشان می‌دهد.



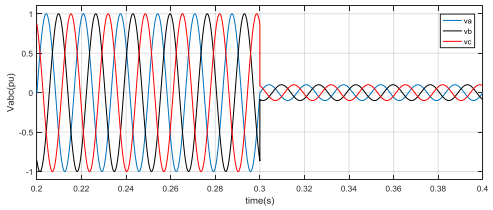
الف)



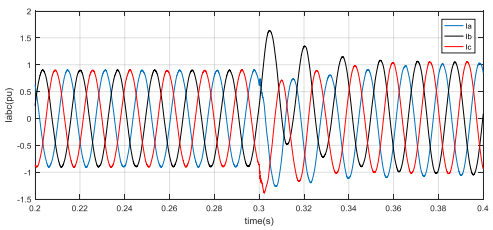
ب)

شکل (۱۲): منحنی ولتاژ و جریان بر حسب پریونیت

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ولتاژ در ثانیه ۰/۳ تا ۰/۷ به‌صورت ناگهانی ۹۰٪ کاهش می‌یابد اما به دلیل عملکرد مناسب سیستم کنترلی در تشخیص به‌موقع خطا و جبران آن، جریان تقریباً ثابت مانده و تغییر شدید نداشته است و تنها در لحظه ۰/۳ و ۰/۷ که تغییر ناگهانی در شبیه‌سازی صورت گرفته است، یک بالایی از خود نشان داده است. برای بررسی دقیق‌تر منحنی‌ها، شکل (۱۳)-الف منحنی ولتاژ و شکل (۱۳)-ب منحنی جریان را در محدوده زمانی کوچک‌تر نشان می‌دهد که کاملاً سینوسی می‌باشد.



الف)

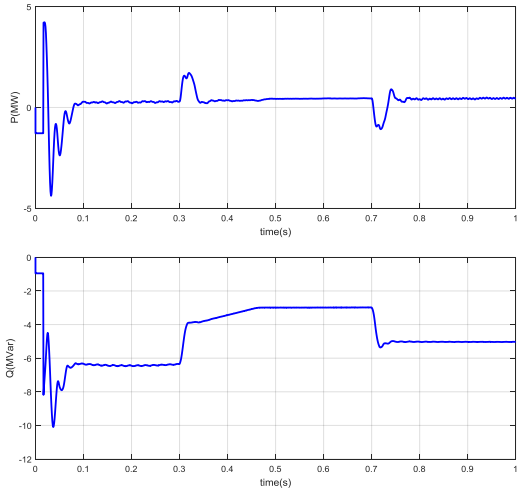


ب)

شکل (۱۳): منحنی ولتاژ و جریان در لحظه وقوع افت ولتاژ (ثانیه ۰/۳)

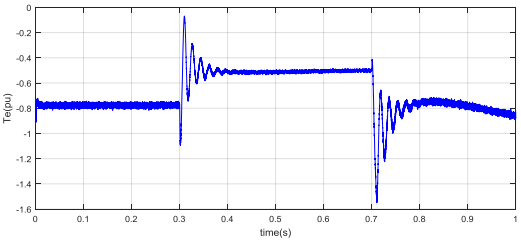
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

شکل (۱۴) منحنی‌های مربوط به توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها درواقع در لحظه وقوع خطا می‌بایست دچار تغییراتی شوند که سبب کنترل ولتاژ لینک DC و در نهایت ولتاژ و جریان شبکه شوند.



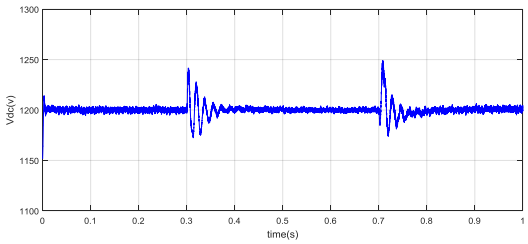
شکل (۱۴): منحنی‌های توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیستم در لحظه ۰/۳ ثانیه که افت ولتاژ ناگهانی صورت می‌گیرد، توان اکتیو مقداری کاهش پیدا می‌کند اما توان راکتیو به دلیل جبران‌سازی خطای ایجاد شده افزایش می‌یابد که کاملاً در شکل‌ها مشخص می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که، هر چه قدر سیستم کنترلی بهتر عمل کند، جبران‌سازی و تشخیص خطا بهتر و زودتر انجام می‌گیرد و این سبب می‌شود که سیستم دچار صدمه و ناپایداری نشود و از این بابت صدمات سنگین به سیستم وارد نگردد. این مورد در منحنی گشتاور الکتریکی مربوط به DFIG کاملاً مشهود می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وقوع خطا و افت ناگهانی ولتاژ در سیستم، توربین بادی به حالت ناپایداری نرسیده و افزایش ناگهانی گشتاور رخ نداده است و سیستم کنترلی به‌خوبی عمل کرده است.



شکل (۱۵): منحنی گشتاور الکترومکانیکی

اما مهم‌ترین منحنی در این شبیه‌سازی‌ها مربوط به منحنی لینک DC می‌باشد که در واقع نقطه اتصالی بین تمامی منابع موجود در شبکه می‌باشد. این منحنی از این بابت حائز اهمیت می‌باشد که در صورتی که با وقوع خطاهای مختلف مقدار آن تقریباً ثابت نماند، شبکه میکروگرید از حالت پایدار به ناپایداری می‌رسد و این صدمه به سیستم وارد می‌کند. شکل (۱۶) منحنی ولتاژ لینک DC را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): منحنی ولتاژ لینک DC

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ولتاژ لینک DC در طول زمان وقوع خطا بدون تغییر در مقدار ثابت ۱۲۰۰ ولت که درواقع ولتاژ مرجع لینک DC می‌باشد، ثابت مانده است و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم کنترلی در تشخیص خطا و جبران آن می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک افت ولتاژ ۹۰٪ در هر سه فاز به‌وقوع پیوست و سیستم در لحظه ۰/۳ ثانیه که افت ولتاژ ناگهانی صورت می‌گیرد، توان اکتیو مقداری کاهش پیدا می‌کند اما توان راکتیو به دلیل جبران‌سازی خطای ایجاد شده افزایش می‌یابد. با وقوع خطا و افت ناگهانی ولتاژ در سیستم، توربین بادی به حالت ناپایداری نرسیده و افزایش ناگهانی گشتاور رخ نداده است و سیستم کنترلی به‌خوبی عمل کرده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم پیشنهادی در این مقاله به خوبی توانسته علاوه بر تشخیص خطا، جبران‌سازی افت ولتاژ را از طریق تثبیت ولتاژ لینک DC و تزریق توان راکتیو به منظور بهبود افت ولتاژ انجام دهد.

سپاسگزاری

در این بخش لازم است تا از راهنمایی‌ها و الطاف بی‌دریغ جناب آقای دکتر عبدالرضا شیخ‌الاسلامی دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تشکر و قدردانی را داشته باشم که اینجانب را در تهیه این مقاله یاری نمودند.

مراجع

[1] Ntuli, Welcome Khulekani, Gulshan Sharma, and Musasa Kabeya. "*Study of Fault Ride-Through Capability of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine.*" 2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC). IEEE, 2022.

[2] Xiao, Fan, et al. "*Study on a new fault phase selector in interconnection line with wind turbine based on doubly-fed induction generator's wind farm.*" Energy Reports 8 (2023): 412-425.

[3] He, Yufei, Minghao Wang, and Zhao Xu. "*Coordinative low-voltage-ride-through control for the wind-photovoltaic hybrid generation system.*" IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 8, no. 2 (2022): 1503-1514.

[4] Raghavendran, C. R., J. Preetha Roselyn, and D. Devaraj. "*Development and performance analysis of intelligent fault ride through control scheme in the dynamic behaviour of grid connected DFIG based wind systems.*" Energy Reports 6 (2020): 2560-2576.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[5] Ma, Kuichao, Jiangsheng Zhu, Mohsen Soltani, Amin Hajizadeh, and Zhe Chen. "*Inter-Turn Short-Circuit Fault Ride-Through for DFIG Wind Turbines.*" IFAC-PapersOnLine 53, no. 2 (2022): 12757-12762.

[6] Li, Zheng, Jiping Lu, Jialin Liu, Ya Zhu, and Qian He. "*Resistance Selection and Control Strategy Considering the Coordination of Protection Performance and Low Voltage Ride Through of a Large-Scale Photovoltaic Power Station.*" IEEE Access 8 (2023): 143746-143758.

[7] Zeb, Kamran, et al. "*Faults and Fault Ride Through strategies for grid-connected photovoltaic system: A comprehensive review.*" Renewable and Sustainable Energy Reviews 158 (2022): 112125.

[8] Musarrat, Md Nafiz, Afef Fekih, and Md Rabiul Islam. "*An improved fault ride through scheme and control strategy for DFIG-based wind energy systems.*" IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31.8 (2021): 1-6.

[9] Xin, Yechun, et al. "*AC fault ride-through coordinated control strategy of LCC-MMC hybrid DC transmission system connected to passive networks.*" International Journal of Electrical Power & Energy Systems 131 (2021): 107076.

[10] Aboelsaud, Raef, et al. "*Model predictive control algorithm for fault ride-through of stand-alone microgrid inverter.*" International Journal of Electrical Power & Energy Systems 135 (2022): 107485.

[11] Moawwad, Ahmed, Mohamed Shawky El Moursi, and Weidong Xiao. "*Advanced fault ride-through management scheme for VSC-HVDC connecting offshore wind farms.*" IEEE Transactions on Power Systems 31, no. 6 (2016): 4923-4934.

[12] Liu, Xubin, Canbing Li, Mohammad Shahidehpour, Yunpeng Gao, Bin Zhou, Yongjun Zhang, Jun Yi, and Yijia Cao. "*Fault current hierarchical limitation strategy for fault ride-through scheme of microgrid.*" IEEE Transactions on Smart Grid 10, no. 6 (2019): 6566-6579.

[13] Morshed, Mohammad Javad, and Afef Fekih. "*A new fault ride-through control for DFIG-based wind energy systems.*" Electric Power Systems Research 146 (2017): 258-269.

[14] Neves, Francisco AS, Miguel Carrasco, Fernando Mancilla-David, Gustavo MS Azevedo, and Valeria S. Santos. "*Unbalanced grid fault ride-through control for single-stage photovoltaic inverters.*" IEEE Transactions on power electronics 31, no. 4 (2015): 3338-3347.

[15] Saleh, Khaled A., Mohamed Shawky El Moursi, and Hatem H. Zeineldin. "*A new protection scheme considering fault ride through requirements for transmission level interconnected wind parks.*" IEEE Transactions on Industrial Informatics 11, no. 6 (2015): 1324-1333.

[16] Mohammadi, J., S. Afsharnia, and S. Vaez-Zadeh. "*Efficient fault-ride-through control strategy of DFIG-based wind turbines during the grid faults.*" Energy conversion and management 78 (2014): 88-95.

[17] Sanusi, Wasiu, Mohamed Al Hosani, and Mohamed Shawky El Moursi. "*A novel DC fault ride-through scheme for MTDC networks connecting large-scale wind parks.*" IEEE Transactions on Sustainable Energy 8, no. 3 (2017): 1086-1095.

[18] Huang, Po-Hsu, Mohamed Shawky El Moursi, and Suud Ademnur Hasen. "*Novel fault ride-through scheme and control strategy for doubly fed induction generator-based wind turbine.*" IEEE transactions on energy conversion 30, no. 2 (2014): 635-645.

[19] Xiao, Fan, et al. "*Study on a new fault phase selector in interconnection line with wind turbine based on doubly-fed induction generator's wind farm*." Energy Reports 8 (2022): 412-425.

[20] Kulkarni, Nishij G., and Vasudeo B. Virulkar. "*Enhancing the Power Quality of Grid Connected Photovoltaic System during Fault Ride Through: A Comprehensive Overview*." Journal of The Institution of Engineers (India): Series B (2023): 1-16.

[21] Rasool, Safdar, Kashem M. Muttaqi, and Danny Sutanto. "*A novel fault ride-through capability improvement scheme for the hybrid offshore wind-wave energy conversion systems*." Electric Power Systems Research 217 (2023): 109166.

[22] Yan, Linfang, et al. "*Fully distributed energy management in smart grids based on diffusion strategy.*" International Journal of Electrical Power & Energy Systems 129 (2021): 106759.

[23] Kumar, P. Satish, et al. "*Energy management system for small scale hybrid wind solar battery based microgrid.*" IEEE Access 8 (2020): 8336-8345.

[24] M. J. Morshed and A. Fekih, "*A Novel Fault Ride Through Scheme for Hybrid Wind/PV Power Generation Systems*," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 4, pp. 2427-2436, October 2020.

[25] Silva, Jéssica Alice A., et al. "*An optimal stochastic energy management system for resilient microgrids.*" Applied Energy 300 (2021): 117435.

رزومه



احسان اکبری در بروجرد متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه مازندران(۱۳۸۹) و کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت را در دانشگاه علوم و فنون مازندران(۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت، تولیدات پراکنده و شبکه‌های توزیع هوشمند می‌باشد و در حال حاضر مربی گروه برق دانشگاه فنی و حرفه‌ای چرخکار بروجرد می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Permanent Magnet Synchronous Generators

[2] DC chopper

[3] Fault Current Hierarchical Limitation

[4] Fuzzy Second Order Integral Terminal Sliding Mode Control

[5] High-Temperature Superconducting

[6] Modulated Series Dynamic Braking Resistor

[7] Fault Ride-Through

[8] Rotor Side Converter

[9] Grid Side Converter

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Detecting and Fault Ride-Through (FRT) in the power system with wind, solar and electric energy storage renewable sources

Ehsan Akbari[1]

1- Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran, akbari.ieee@gmail.com

Abstract: The proposed structure of this article is a hybrid wind-solar-storage system with fault tolerance that reduces output power fluctuations and voltage drop in the system caused by faults. In the proposed topology, the solar system is connected to the DFIG through a DC-DC converter, thus eliminating the need for a special inverter for the solar system and reducing the cost. The power management in this system is done using the converters of the rotor section and the DC-DC controller related to the DC link using the phased method, which is why there is no need to use a compensator in the system. The better the control system works, the better and sooner the fault detection and compensation will be done, and this will prevent the system from being damaged and unstable, and will not cause serious damage to the system. In this thesis, the simulation results for two scenarios were investigated. In both scenarios, the active power decreases during 0.3 seconds when a sudden voltage drop occurs, but the reactive power increases due to the compensation of the created error. With the occurrence of an error and a sudden voltage drop in the system, the wind turbine has not reached an unstable state and a sudden increase in torque has not occurred, and the control system has worked well. Therefore, in this research, the proposed system was able to perform fault detection and voltage drop compensation through DC link voltage stabilization and reactive power injection in order to improve the voltage drop. It should be noted that all simulations were done in MATLAB/Simulink software.

Keywords: Fault Ride-Through (FRT), Renewable Energy, wind, solar, electrical energy storage.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.2.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]