

Reliability analysis of frequency converter used in wind turbines

Alireza Alesaadi¹, Reza Ghafouri², Babak, Gholami³, Mohammad Mehdi Ghanbarian⁴

1-Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
alesaadi@iau.ac.ir

2-Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
reza.ghafouri@iau.ac.ir

3-Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
gholamibox@gmail.com

4-Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

Received: 21 September 2024

Revised: 15 November 2024

Accepted: 18 November 2024

Abstract:

Due to the problem of environmental pollution, one of the causes of which is the burning of fossil fuels such as coal, oil, natural gas, and diesel in traditional power plants such as gas, steam, and combined cycle power plants. In recent years, renewable power plants have enjoyed a great growth to produce electricity in the power grid. Among the different types of renewable power plants, wind power plants, photovoltaic power plants, geothermal power plants, sea wave power plants, flow-type hydropower plants and reservoir-type hydropower plants with large capacity have been put into operation and can be used to produce clean electricity in the power grid. Reservoir-type tidal power plants can be used to generate electricity through the construction of a dam on the sea and the possibility of storing water in a reservoir. Through the valves embedded in the dam wall, water can move between the sea and the reservoir during high tide and generate electricity by passing through the turbines placed in the valves. In order to produce electricity in a tidal power plant, there are three strategies, which are production in ebb, production in flood and two-way production. In this article, these three strategies are examined and the equations related to each of these strategies are determined. Then, a simulation based on tidal height data and the characteristics of a typical reservoir tidal power plant in a site with suitable tidal potential was carried out in order to select the most suitable strategy for electricity generation in the desired area.

Keywords: reservoir-type tidal power plant, operation strategy, ebb-generation mode, flood-generation mode, two-way generation mode.

Corresponding Author: Alireza Alesaadi

Corresponding Author Address: Department of Electrical Engineering- Kazerun Branch -Islamic Azad University- Kazerun, Iran

تحلیل قابلیت اطمینان مبدل فرکانس مورد استفاده در توربین‌های بادی

علیرضا آل سعدی^۱، مربی، رضا غفوری^۲، مربی، بابک غلامی^۳، مربی، محمد مهدی قنبریان^۴، استادیار

۱- گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

alesaadi@iau.ac.ir

۲- گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

reza.ghafouri@iau.ac.ir

۳- گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

Gholamibox@gmail.com

۴- گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

mm.ghanbarian@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

چکیده: امروزه توربین‌های بادی توسعه زیادی در سیستم قدرت یافته‌اند و نقش مهمی در تامین برق مورد نیاز کشورهای پیشرفته بازی می‌کنند. در ساختار این توربین‌های بادی، جهت تولید برق از انرژی جنبشی توده هوا، ژنراتورهای الکتریکی مختلفی قابل استفاده است. یکی از ژنراتورهای مناسب که در این توربین‌ها بسیار استفاده شده است، ژنراتور القایی دو سو تغذیه می‌باشد. در ساختار این توربین‌های بادی، در روتور یک مبدل فرکانس قرار گرفته که شامل یک یکسوساز، یک خازن و یک اینورتر می‌باشد. مبدل فرکانس از نیمه‌هادی‌ها تشکیل شده است که این تجهیزات نسبت به تغییرات دما بسیار حساس می‌باشند. بر همین اساس در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های فرکانس مورد استفاده در توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه با در نظر گرفتن اثر تغییرات سرعت باد انجام می‌شود. با تغییر سرعت باد، توان تولیدی ژنراتور القایی تغییر کرده و جریان عبوری از تجهیزات تشکیل دهنده مبدل فرکانس نیز تغییر می‌کند. با تغییر جریان عبوری از این تجهیزات، تلفات توان و در نتیجه گرمای تولیدی در این تجهیزات نیز تغییر می‌کند که سبب تغییر دمای این تجهیزات می‌شود. بنابراین نرخ خرابی و قابلیت اطمینان مبدل فرکانس مورد استفاده در توربین بادی به دلیل تغییر سرعت باد تغییر می‌کند که در این مقاله این تغییرات بررسی می‌شود. با انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب چگونگی انجام این تغییرات نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: نیروگاه بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، مبدل فرکانس، قابلیت اطمینان، تغییر سرعت باد، نرخ خرابی.

نام نویسنده‌ی مسئول: علیرضا آل سعدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

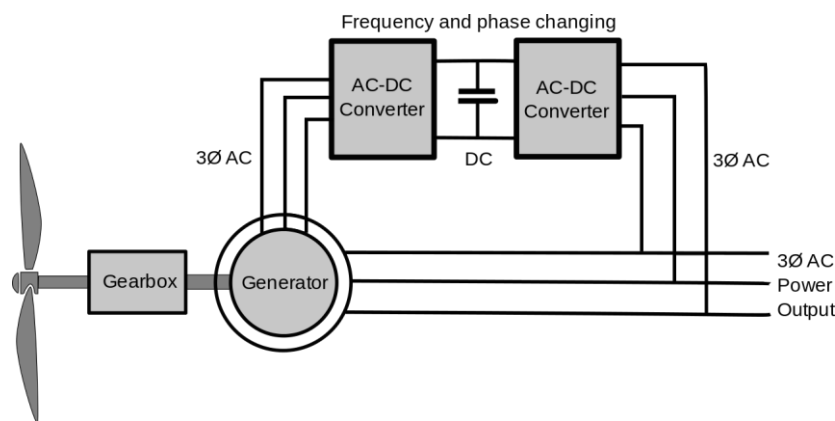
به دلیل مزایایی که منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق نظیر کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نظیر گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن، منواکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن دارند در سال‌های اخیر نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به طور گسترده نصب شده و به منظور تولید برق مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در توربین‌های بادی می‌توان از تکنولوژی‌های مختلفی به منظور تولید برق بهره برد که در واقع نوع ژنراتورهای به کار رفته در آن است که عبارتند از: ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم، ژنراتورهای سنکرون با تحریک الکتریکی، ژنراتورهای القایی قفس سنجایی، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه بدون جاروبک و ... از بین این تکنولوژی‌های بیان شده، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه به دلیل ساختار مناسبی که دارند به طور گسترده در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نیروگاه‌ها، یک مبدل الکترونیک قدرت در روتور ژنراتور القایی قرار گرفته و ولتاژ سه فاز روتور را ابتدا از طریق یک یکسوساز به ولتاژ dc تبدیل می‌کند. یک خازن نیز در لینک dc به منظور صاف نمودن ولتاژ لینک dc قرار می‌گیرد. سپس از طریق یک اینورتر ولتاژ dc به ولتاژ ac تبدیل می‌شود و به شبکه جهت انتقال توان متصل می‌گردد. توان تولیدی ژنراتور از طریق استاتور نیز مستقیماً به شبکه قدرت متصل می‌گردد. بنابراین در ساختار ژنراتور القایی دو سو تغذیه المان‌های مختلفی نظیر توربین، ژنراتور القایی، مبدل پشت به پشت شامل یکسوساز، لینک dc شامل خازن و اینورتر، ترانسفورماتور و کابل وجود دارد. با تغییر سرعت باد، سرعت چرخش توربین و در نتیجه سرعت چرخش روتور نیز تغییر می‌کند و با تغییر سرعت چرخش روتور، توان تولیدی ژنراتور القایی دو سو تغذیه نیز تغییر کرده که در نهایت منجر به تغییر جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های روتور، سیم‌پیچ‌های استاتور، المان‌های یکسوساز، خازن و المان‌های اینورتر می‌شود. بنابراین با تغییر جریان عبوری از این تجهیزات، تلفات توان نیز تغییر کرده و لذا دمای کارکرد نیز تغییر می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود نرخ خرابی این تجهیزات متأثر از تغییر سرعت باد باشد که در این مقاله، هدف تعیین نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل فرکانس در سرعت‌های باد مختلف می‌باشد. با تعیین نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل فرکانس، می‌توان قابلیت اطمینان این تجهیزات را نیز مطالعه نمود. با توجه به اهمیت مطالعه قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. در [۱] تأثیر همبستگی بین سرعت باد و دسترس‌پذیری توربین بادی به منظور مطالعه قابلیت اطمینان مزرعه بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله سیستم ۷۹ باسه IEEE-RTS در دو حالت با در نظر گرفتن همبستگی منفی بین سرعت باد و قابلیت اطمینان توربین بادی مورد مطالعه قرار گرفته است و با استفاده از روش کونولوشن گسسته شاخص‌های قابلیت اطمینان به دست آمده در این دو حالت با هم مقایسه شده است. در [۲] قابلیت اطمینان مبدل‌های قدرت به کار رفته در توربین‌های بادی مورد مطالعه قرار گرفته است و نرخ خرابی این تجهیزات با داشتن داده‌های بهره‌برداری بررسی شده است. در این مقاله با داشتن نرخ خرابی مبدل‌های قدرت از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ که مربوط به حدود ۷۴۰۰ سال کارکرد توربین‌های بادی سرعت متغیر ساخت شرکت‌های مختلف می‌باشد مطالعه قابلیت اطمینان مبدل‌ها انجام شده است. داده‌های مورد استفاده در این مقاله مربوط به کارکرد توربین‌های بادی نصب شده هم به صورت نصب در ساحل و هم نصب در دریا، در ۲۳ کشور جهان می‌باشد. در [۳] بر اساس ارزیابی استرس الکتریکی - حرارتی صورت گرفته بر روی نیمه‌هادی‌های به کار رفته در مبدل‌های الکترونیک قدرت توربین‌های بادی مدت زمان تا خرابی این تجهیزات با استفاده از روش مونت کارلو تخمین زده شده است. در این مقاله توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار گرفته و توزیع وایبال به منظور مدل نمودن تغییرات سرعت باد پیشنهاد شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده از بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد استفاده در توربین‌های بادی، یک مبدل قدرت مناسب که از نقطه نظر قابلیت اطمینان بهینه باشد انتخاب شده است. در [۴] قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در سطح مبدل‌های به کار رفته در این توربین‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که دینامیک حرارتی نیمه‌هادی‌های قدرت و خازن‌ها به قابلیت اطمینان مرتبط بوده که هزینه تمام شده مبدل‌های الکترونیک قدرت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر همین اساس به منظور تعیین دسترس‌پذیری توربین بادی با در نظر گرفتن نرخ نمونه‌برداری ۱ ساعت، مدل ساده شده مربوط به تلفات، مدل حرارتی مربوط به کلیدهای قدرت اکتیو و خازن‌های پسیو به دست آمده و بر اساس پروفیل الکتریکی - حرارتی طول عمر تجهیزات به کار رفته در این مبدل‌ها تخمین زده شده

است. توزیع مبتنی بر وایبال به منظور لینک نمودن قابلیت اطمینان از سطح تجهیزات به سطح مبدل مورد استفاده قرار گرفته و یک توربین بادی ۲ مگاواتی به کمک روش پیشنهادی ارزیابی شده است. در [۵] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور سطح بالایی از تولیدات نیروگاه بادی با در نظر گرفتن محدودیت پایداری فرکانسی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله تاثیر تغییرات سرعت باد و همچنین مشخصه اینرسی کم توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته و بیان شده است که جایگزین شدن واحدهای متعارف توسط توربین بادی اثرات منفی بر پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت دارد. روش پیشنهادی این تحقیق به منظور مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی مبتنی بر کانولوشن گسسته بوده و به یک سیستم استاندارد ۷۹ باسه در دو حالت بدون در نظر گرفتن تاثیر تغییرات سرعت باد و اینرسی پایین توربین بادی و همچنین با در نظر گرفتن اثر توربین بادی اعمال شده و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شده است. در [۶] ساختار هیبرید مزارع بادی متصل به کابل از نقطه نظر قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که با خراب شدن کابل‌های متصل به نیروگاه بادی امکان اتصال توان تولیدی نیروگاه به شبکه وجود ندارد و لذا بررسی قابلیت اطمینان توربین بادی با در نظر گرفتن اثر خرابی کابل انجام شده است. دو مزرعه بادی مختلف با داده‌های اقلیمی یکسان با دو ساختار کابلی در نظر گرفته شده و میزان انرژی متوسط تامین نشده آن‌ها محاسبه و با هم مقایسه شده است. در [۷] مروری بر داده‌های قابلیت اطمینان توربین‌های بادی نصب شده در ساحل و همچنین نصب شده در دریا صورت گرفته و تاثیر آن‌ها بر هزینه برق تولیدی این نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نرخ‌های خرابی و مدت زمان خرابی توربین‌های بادی از ۱۸۰۰۰ توربین بادی نصب شده و با در نظر گرفتن ۹۰۰۰۰ سال کارکرد این توربین‌های بادی به دست آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان تجهیزات مختلف، مقایسه نیروگاه‌های بادی واقع در ساحل و دریا، و تعیین منابع مربوط به عدم قطعیت مورد تحلیل قرار گرفته است. در [۸] از روش آنالیز مودهای خرابی و تاثیر آن‌ها به منظور مطالعه قابلیت اطمینان توربین‌های بادی استفاده شده است. مطالعه قابلیت اطمینان صورت گرفته در این مقاله بر روی یک توربین بادی ۲ مگاواتی مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه انجام شده و سپس با یک توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه بدون جاروبک مقایسه شده است. در [۹] قابلیت اطمینان دو توربین‌های بادی مختلف با در نظر گرفتن اثر گیربکس انجام شده و بر این اساس قابلیت اطمینان توربین‌های بادی با اتصال مستقیم و توربین‌های بادی مجهز به گیربکس با هم مقایسه شده است. در این مقاله یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد مطالعه قرار گرفته و مدل قابلیت اطمینان این توربین در دو حالت مجهز به گیربکس و بدون آن با در نظر گرفتن خرابی تجهیزات تشکیل دهنده به دست آمده است. در [۱۰] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی مقیاس بزرگ مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه با در نظر گرفتن خرابی تجهیزات تشکیل دهنده و تغییرات سرعت باد به دست آمده است. مدل چند حالتی به دست آمده به منظور ارزیابی کفایت سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار گرفته و شاخص‌های قابلیت اطمینان متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده محاسبه شده است. در [۱۱] قابلیت اطمینان توربین‌های جزرومدی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت به ویژه نیمه‌های شامل دیودها و کلیدها، با در نظر گرفتن تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی محاسبه شده و بر این اساس نرخ خرابی این تجهیزات به دست آمده است. در [۱۲] قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی و جزرومدی با در نظر گرفتن اثر ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله قابلیت اطمینان توربین‌های بادی و جزرومدی نوع جریانی با در نظر گرفتن اثر خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی و همچنین تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۳] دو توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با هم مقایسه شده‌اند. در این مقاله داده‌های مربوط به مطالعه ۱۸۰۰ توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه و ۴۰۰ توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۴] قابلیت اطمینان سیستم مبدل انرژی بادی مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله یک کنترل هماهنگ بین واحد بادی و جبران‌ساز استاتیکی به منظور بهبود قابلیت اطمینان و عملکرد واحد بادی در حالت متصل به شبکه در هنگام بروز اغتشاشات در سیستم قدرت پیشنهاد شده است. به منظور

آشکارسازی خطا در این سیستم نیز یک روش جدید بر اساس پایش ولتاژ روتور و جریان ژنراتور القایی دو سو تغذیه با استفاده از تکنیک مولفه‌های متقارن پیشنهاد داده شده است. در [۱۵] از طریق کنترل زمان واقعی، قابلیت اطمینان مبدل انرژی بادی مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه بهبود داده شده است. در این مرجع با استفاده از روش کنترل در زمان واقعی، عمر مفید سیستم ماکزیمم شده و میزان انرژی تولیدی آن نیز در طول این مدت زمان افزایش یافته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از یک کنترل مبتنی بر فیلتر پایین‌گذر می‌توان مدت زمان متوسط بین خرابی‌ها و عمر مفید مازول‌های قدرت را افزایش داد. در [۱۶] سیستم تبدیل انرژی بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه مورد مطالعه قرار گرفته و چالش‌هایی که این واحدها در هنگام اتصال به شبکه قدرت دارند بررسی شده است. مدل غیرخطی توربین بادی با ساختار ژنراتور القایی دو سو تغذیه با توان $1/2$ مگاوات در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و مشکلات کنترلی این واحدها بیان شده است. در [۱۷] روش تشخیص خرابی بلبرینگ در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه که در توربین‌های بادی به کار می‌رود بیان شده است. روش پیشنهادی این مقاله بر اساس سیگنال‌های الکتریکی موجود در این ژنراتورها بوده که مبتنی بر آنالیز جریان استاتور می‌باشد. در این مقاله اصول تئوری این روش بیان شده و رابطه بین دامنه و فاز سیگنال‌های جریان استاتور و گشتاور نوسانی به دست آمده است. به منظور بررسی روش پیشنهادی نتایج آزمایشگاهی مربوط به یک توربین بادی $1/5$ مگاواتی آورده شده است. مقاله [۱۸] یک سیستم تحمل خطای بهبود یافته را برای توربین‌های بادی مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه پیشنهاد می‌دهد که بر اساس کنترل ولتاژ استاتور در مواقع کاهش ولتاژ متعادل، نامتعادل و متقارن عمل می‌کند. در این روش ولتاژ استاتور از طریق مبدل‌های توان سمت روتور تنظیم می‌شوند و لذا نوسان‌های جریان سمت روتور و استاتور که سبب کاهش ولتاژ می‌شوند کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. به منظور بررسی روش پیشنهادی هم نتایج شبیه‌سازی و هم نتایج آزمایشگاهی آورده شده است. در [۱۹] روش تشخیص خرابی گیربکس‌های توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه از طریق آنالیز پوش جریان استاتور آورده شده است. در این مقاله بیان شده است که خرابی گیربکس سبب تحمیل هزینه تعمیرات نگهداری زیاد در توربین‌های بادی می‌شود و بر قابلیت اطمینان این توربین‌ها تاثیر بسزایی دارد. لذا تشخیص خرابی گیربکس‌ها مهم بوده و بر این اساس از بین روش‌های مختلف تعیین خرابی گیربکس از سیگنال‌های الکتریکی جمع‌آوری شده از پایانه ژنراتور استفاده شده است. در این مقاله اثبات شده است که پوش سیگنال جریان استاتور متناسب با فرکانس چرخش محور ژنراتور القایی دو سو تغذیه بوده و بر این اساس خرابی گیربکس تشخیص داده می‌شود. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی نتایج تست آزمایشگاهی یک توربین بادی $1/6$ مگاواتی آورده شده است. در [۲۰] یک مبدل قدرت با قابلیت اطمینان بالا برای توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه پیشنهاد داده شده است. در این مبدل زمانی که یک خطا در مبدل سمت شبکه یا مبدل سمت روتور اتفاق بیفتد، یک ساختار سه فاز هار کلیده پیشنهاد داده شده است تا از ایجاد بازوی پل ذخیره جلوگیری نماید که سبب می‌شود پیچیدگی ساختار کمتر شده و تلفات حالت هدایت و کلیدزنی کاهش یابد. به منظور بررسی روش پیشنهادی در محیط سیمولینک متلب یک توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به یک مبدل پشت به پشت شبیه‌سازی شده است. با توجه به مقالات مرور شده، عمده کارهایی که تاکنون در تحقیقات گذشته صورت گرفته قابلیت اطمینان نیروگاه بادی را بر اساس دسترس‌پذیری کل نیروگاه مشخص نموده‌اند و تنها در چند مرجع تاثیر خرابی تجهیزات تشکیل‌دهنده را بر قابلیت اطمینان کل سیستم بررسی نموده است. بنابراین در این مقاله به منظور تکمیل نمودن کارهای گذشته تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت به کار رفته در مبدل فرکانس بررسی شده است. بر همین اساس ساختار این مقاله به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه و مبدل فرکانس به کار رفته در این نیروگاه‌ها مطالعه شده است. در بخش سوم روابط مربوط به نرخ خرابی مبدل‌های فرکانس و تجهیزات تشکیل دهنده آن‌ها آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی مربوط به بررسی تاثیر تغییر سرعت باد بر نرخ خرابی مبدل فرکانس به کار رفته در نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه در بخش چهارم و همچنین نتیجه‌گیری تحقیق در بخش پنجم آورده شده است.

۲- نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه

ژنراتورهای مختلفی به منظور تبدیل انرژی جنبشی توربین بادی به انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارتند از ژنراتور القایی قفس سنجایی، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، ژنراتور سنکرون با تحریک الکتریکی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، ژنراتور القایی دو سو تغذیه بدون جاروبک و ... از بین تکنولوژی‌های مختلف مربوط به ژنراتورها، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه به دلیل عملکرد خوبی که در رنج سرعت‌های مختلف دارند استفاده وسیعی در توربین‌های بادی داشته‌اند؛ به گونه‌ای که بیشتر ژنراتورهای به کار رفته در نیروگاه‌های بادی نصب شده در جهان مبتنی بر این ژنراتورها بوده است. بر همین اساس در این مقاله به مطالعه نیروگاه‌های بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه پرداخته شده است. در شکل ۱ شمای یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه نشان داده شده است.

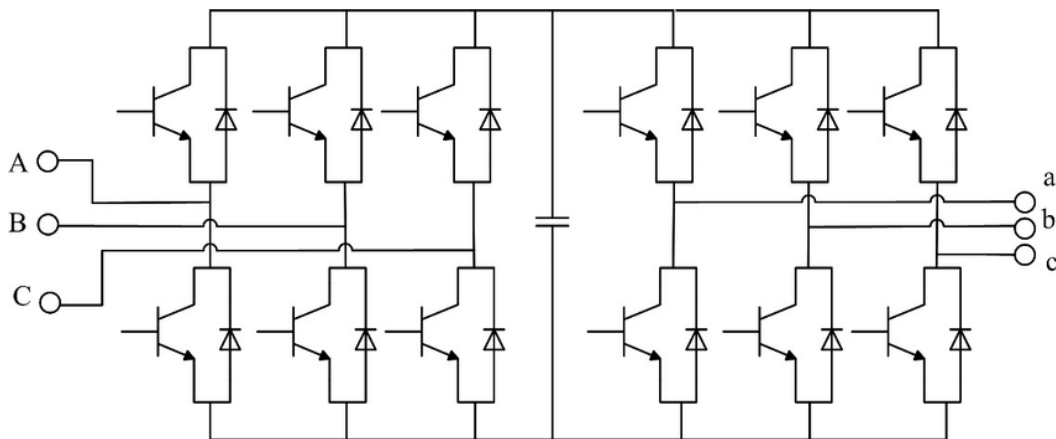


شکل (۱): توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه [۳]

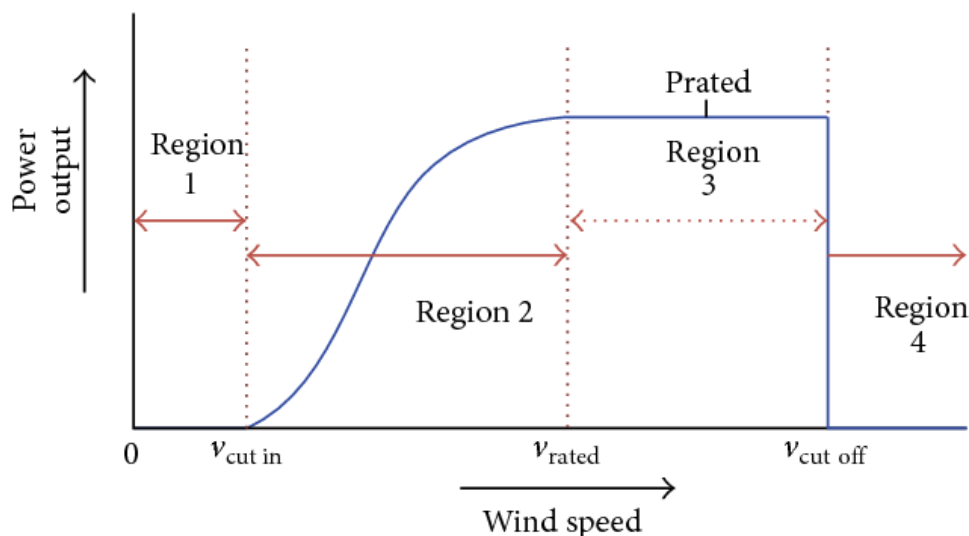
همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود ژنراتور القایی دو سو تغذیه در واقع یک ژنراتور القایی با روتور سیم‌پیچی شده است. در این نوع ژنراتور، استاتور مستقیماً به شبکه وصل می‌شود، اما روتور از طریق یک مجموعه مبدل الکترونیک قدرت که مبدل پشت به پشت نام دارند به شبکه متصل می‌شود. مجموعه مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت شامل دو مبدل یکی یکسوساز است که برق AC را به برق DC تبدیل می‌کند و دیگری یک اینورتر است که برق AC را به برق DC تبدیل می‌کند. در بین این دو مبدل الکترونیک قدرت که ولتاژ به صورت DC می‌باشد یک خازن قرار داده شده است تا برق DC را صاف نماید. در شکل ۲ ساختار مبدل پشت به پشت بطور کامل‌تر نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است هم یکسوساز و هم اینورتر از ۶ دیود موازی که هر کدام از این دیودها با یک کلید الکترونیک قدرت موازی شده‌اند تشکیل شده است. جنس هر کدام از این دیودها یا کلیدهای الکترونیک قدرت از نیمه‌هادی‌ها می‌باشد که بر اساس یک سیستم کنترلی به منظور دستیابی به ولتاژ خروجی با دامنه ولتاژ و فرکانس مشخص کلیدزنی می‌شوند. کلیدهای الکترونیک قدرت می‌توانند از نوع IGBT انتخاب شوند. بنابراین یک مبدل پشت به پشت به منظور تبدیل برق AC تولیدی ژنراتور القایی دو سو تغذیه که به دلیل تغییر سرعت باد ممکن است هر ولتاژ یا فرکانسی را داشته باشد، به یک برق AC با ولتاژ و فرکانس مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. به یکسوساز این مبدل، یکسوساز سمت ژنراتور و به اینورتر آن اینورتر سمت شبکه نیز گفته می‌شود.

توان تولیدی یک نیروگاه بادی به سرعت وزش باد بستگی دارد و رابطه بین توان تولیدی نیروگاه بادی و سرعت باد بر اساس یک منحنی که منحنی توان توربین نام دارد بیان می‌شود. در شکل ۳ یک منحنی توان توربین برای نیروگاه‌های بادی متداول نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است توان تولیدی نیروگاه بادی به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین صفر می‌باشد. به ازای سرعت وزش باد که در محدوده بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی قرار دارند میزان توان تولیدی متناسب با مکعب سرعت باد می‌باشد و همان‌طور که مشخص است با زیاد شدن سرعت باد، توان تولیدی نیروگاه بادی نیز افزایش می‌یابد. به ازای سرعت‌های باد که بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا قرار گرفته‌اند توان تولیدی

نیروگاه بادی مقداری ثابت و برابر با توان نامی نیروگاه خواهد بود. همچنین زمانی که سرعت نیروگاه بادی از سرعت قطع بالا بیشتر می‌شود به منظور اینکه از آسیب رسیدن به توربین بادی جلوگیری شود از چرخش توربین بادی جلوگیری شده و لذا توان تولیدی واحد بادی به ازای این سرعت‌ها صفر خواهد بود. بنابراین به این صورت نیست که هر چه سرعت وزش باد در یک منطقه بیشتر باشد توان تولیدی نیروگاه بادی نیز بیشتر می‌شود، چرا که ممکن است سرعت باد از سرعت قطع بالای نیروگاه بادی فراتر رود که سبب می‌شود توان تولیدی واحد بادی صفر گردد.



شکل (۲): ساختار مبدل پشت به پشت [۱۱]

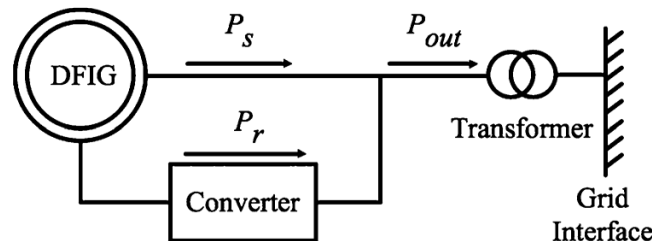


شکل (۳): منحنی توان یک توربین بادی [۲]

در این قسمت از تحقیق روابط مربوط به توان تولیدی نیروگاه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه بیان می‌گردد. در ژنراتور القایی همان‌گونه که از نامش پیداست بر اساس القای الکترومغناطیسی، ولتاژ در سیم‌پیچ‌های ژنراتور القا می‌گردد. حتی در حالت موتوری ولتاژ از استاتور در سیم‌پیچ‌های روتور القا می‌گردد. اما زمانی القا از استاتور به روتور اتفاق می‌افتد که سرعت میدان چرخان با سرعت چرخش روتور متفاوت باشد. بر همین اساس یک کمیت مهم در ماشین‌های القایی به نام لغزش تعریف می‌گردد که رابطه آن به صورت زیر خواهد بود:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (۱)$$

در رابطه فوق S لغزش، N_S سرعت سنکرون یا سرعت میدان چرخان و N_R سرعت چرخش روتور می‌باشد. در شرایطی که سرعت روتور صفر باشد، لغزش ۱ و در شرایطی که سرعت روتور با سرعت سنکرون برابر شود مقدار لغزش صفر خواهد بود. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، میزان توان خروجی یک توربین بادی بر اساس منحنی توان توربین مشخص می‌شود. این توان خروجی که توان الکتریکی است در واقع در خروجی ژنراتور القایی دو سو تغذیه وجود دارد. در این ژنراتور القایی بخشی از این توان تولیدی از طریق استاتور و بخشی دیگر از طریق روتور منتقل می‌گردد که این امر در شکل ۴ مشخص می‌باشد.



شکل (۴): نمودار انتقال توان در ژنراتور القایی دو سو تغذیه

بر اساس روابط توان موجود در ژنراتورهای القایی، میزان توان تولیدی در استاتور و روتور یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه به صورت زیر خواهد بود:

$$P_r = -\frac{S}{1-S} P_{out} \quad (۲)$$

$$P_s = \frac{1}{1-S} P_{out} \quad (۳)$$

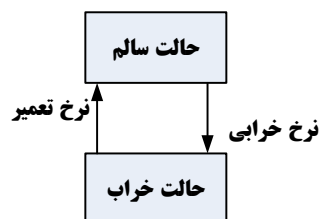
در روابط فوق، P_{out} و P_s ، P_r به ترتیب توان روتور، توان استاتور و توان خروجی یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه می‌باشد. میزان ولتاژ القایی در استاتور یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه، همان ولتاژ خروجی ژنراتور بوده و میزان ولتاژ القایی در روتور به نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور و همچنین اندازه لغزش بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_R = S \frac{N_{RW}}{N_{SW}} V_S \quad (۴)$$

در رابطه فوق V_R ، V_S ، N_{RW} ، N_{SW} به ترتیب عبارتند از: تعداد دور سیم‌پیچ استاتور، تعداد دور سیم‌پیچ روتور، ولتاژ القایی در استاتور و ولتاژ القایی در روتور. بنابراین با داشتن مقادیر توان استاتور و روتور و همچنین ولتاژهای استاتور و روتور به راحتی می‌توان جریانی که در هر کدام از این سیم‌پیچ‌ها جاری می‌شود را به دست آورد.

۳- نرخ خرابی مبدل فرکانس به کار رفته در نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه

در این بخش از تحقیق به مطالعه نرخ خرابی مبدل فرکانس مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه، و همچنین چگونگی وابستگی نرخ خرابی اجزا به تغییرات سرعت باد پرداخته می‌شود. در مطالعات قابلیت اطمینان برای هر کدام از تجهیزات یک مدل مارکوف در نظر گرفته می‌شود. این مدل مارکوف حالت‌های مختلفی را که یک تجهیز می‌تواند داشته باشد نشان می‌دهد. در این تحقیق یک مدل مارکوف دو حالت برای هر کدام از تجهیزات نیروگاه در نظر گرفته می‌شود. این مدل مارکوف شامل دو حالت سالم و خراب می‌باشد. نرخ انتقال از حالت سالم به خراب را نرخ خرابی می‌نامیم و با λ نشان می‌دهیم. همچنین نرخ انتقال از حالت خراب به حالت سالم را نرخ تعمیر می‌نامیم و با μ نمایش می‌دهیم. در شکل ۵ یک مدل مارکوف دو حالت نشان داده شده است.



شکل (۵): مدل مارکوف دو حالت

مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت یا همان مبدل فرکانس در واقع در روتور قرار گرفته و به صورت ترکیبی از یک یکسوساز سمت ژنراتور، لینک dc که شامل یک خازن است، و یک اینورتر سمت شبکه می‌باشد. به دلیل تغییر سرعت باد، ولتاژ و فرکانس تولیدی ژنراتور القایی دو سو تغذیه تغییر می‌کند و به همین دلیل از یک مبدل پشت به پشت استفاده می‌شود تا توان تولیدی ژنراتور با فرکانس و ولتاژ ثابت به شبکه منتقل شود. با توجه به اینکه بخشی از توان تولیدی ژنراتور القایی دو سو تغذیه از طریق استاتور و بخش کمتری از طریق روتور منتقل می‌گردد ظرفیت نامی مبدل‌های الکترونیک قدرت به کار رفته در مبدل پشت به پشت کمتر از مقدار نامی ژنراتور بوده و لذا این مبدل قیمت کمتری به نسبت مبدل‌های با توان کامل خواهد داشت. به منظور تعیین نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت باید میزان تلفات توان در نیمه‌های ناظر دید و کلیدهای الکترونیک قدرت را که سبب افزایش دمای این نیمه‌های ناظر می‌گردند محاسبه نمود. در یک مبدل پشت به پشت که ترکیبی از یک یکسوساز، یک خازن و یک اینورتر است ۶ دیود در ساختار یکسوساز و ۶ کلید IGBT در ساختار اینورتر به عنوان نیمه-های ناظر موجود در این تجهیز در نظر گرفته می‌شود. حال باید جریان عبوری از این نیمه‌های ناظر به دست آورده شود. مقدار پیک جریان عبوری از دیودهای یکسوساز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{PR} = \frac{\sqrt{2}P_r}{\sqrt{3}V_R} \quad (۵)$$

در رابطه فوق I_{PR} پیک جریان عبوری از یکسوساز می‌باشد. با توجه به اینکه یکسوساز به روتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل شده است مقدار جریان آن با جریان روتور برابر می‌باشد. اما پیک جریان عبوری از نیمه‌های ناظر اینورتر متصل به شبکه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{PI} = \frac{\sqrt{2}P_r}{\sqrt{3}V_S} \quad (۶)$$

در رابطه فوق I_{PI} جریان پیک اینورتر سمت شبکه است که از تقسیم توان روتور به ولتاژ استاتور که برابر با ولتاژ شبکه‌ای است که در خروجی ژنراتور قرار گرفته است حاصل می‌گردد. به منظور تعیین میزان تلف شده در نیمه‌های ناظر می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۱]:

$$P_{LOSS-SC} = 0.5[U_0 \frac{I_P}{\pi} + r \frac{I_P^2}{4}] + m \cos \phi [U_0 \frac{I_P}{8} + r \frac{I_P^2}{3\pi}] + \frac{U_{DC}}{U_{nom}} P_{SW} \quad (۷)$$

در رابطه فوق $P_{LOSS-SC}$ توان تلف شده در هر نیمه‌های ناظر دیود یا IGBT است، U_0 افت ولتاژ روی نیمه‌های ناظر، r مقاومت نیمه‌های ناظر، m شاخص مدولاسیون، زاویه ϕ زاویه بین ولتاژ و جریان، I_P پیک جریان عبوری از نیمه‌های ناظر، U_{DC} ولتاژ خازن لینک DC و U_{nom} ولتاژ نامی می‌باشد. با توجه به اینکه نیمه‌های ناظر بر روی یک سینک حرارتی قرار گرفته‌اند سبب انتقال حرارت به سینک حرارتی می‌شوند. بنابراین با توجه به دمای سینک حرارتی و میزان افزایش دمای نیمه‌های ناظر، دمای پیوند هر کدام از نیمه‌های ناظر به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$T_{VJ} = T_{HS} + \Delta T_{CH} \quad (۸)$$

در رابطه فوق T_{VJ} دمای پیوند، T_{HS} دمای سینک حرارتی و ΔT_{CH} میزان افزایش دما به خاطر گرم شدن هر کدام از نیمه‌های-ها است. میزان افزایش دمای مربوط به هر کدام از نیمه‌های-ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta T_{CH} = P_{LOSS-SC} R_{CH} \quad (9)$$

در رابطه فوق R_{CH} مقاومت حرارتی مربوط به سینک حرارتی تا واسطه می‌باشد. دمای سینک حرارتی نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{HS} = T_A + \left(\sum_{i=1}^{12} P_{LOSS-SC_i} \right) R_{TH} \quad (10)$$

در رابطه فوق T_A دمای محیط بوده، R_{TH} مقاومت حرارتی معادل از محل پیوند تا نیمه‌های-ها می‌باشد. به منظور تعیین دمای سینک حرارتی بایستی میزان افزایش دمای مربوط به ۱۲ نیمه‌های-ها به کار رفته در مبدل پشت به پشت در نظر گرفته شود که هر کدام از این افزایش دماها از ضرب میزان تلفات مربوطه در مقاومت حرارتی به دست می‌آید. به منظور تعیین نرخ خرابی هر نیمه‌های می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۱]:

$$\lambda = \pi_G [\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TCO} + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TC} \pi_{CR} \pi_{DT}] + \lambda_{SJ} + \lambda_{EOS} \quad (11)$$

در رابطه فوق λ نرخ خرابی یک نیمه‌های (بر حسب خرابی در هر میلیون ساعت)، λ_{OB} ، λ_{EB} و λ_{TC} به ترتیب نشان‌دهنده نرخ‌های خرابی پایه بهره‌برداری، عدم بهره‌برداری یا محیطی و سیکل دمایی می‌باشند. همچنین λ_{SJ} و λ_{EOS} به ترتیب نشان‌دهنده مشارکت نرخ خرابی مربوط به پیوند جوش خورده و استرس‌های شدید الکتریکی می‌باشند. به علاوه π_G فاکتور رشد نرخ خرابی، π_{TO} و π_{TE} به ترتیب فاکتورهای شتاب‌دهنده دما در شرایط بهره‌برداری و عدم بهره‌برداری، π_{CR} و π_{DT} به ترتیب فاکتور شتاب‌دهنده نرخ سیکل دمایی و فاکتور شتاب‌دهنده سیکل دمایی دلتا و π_{DCO} و π_{DCN} به ترتیب فاکتورهای چرخه کار در شرایط بهره‌برداری و عدم بهره‌برداری می‌باشند. فاکتور رشد نرخ خرابی بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\pi_G = e^{-\beta(\Delta y)} \quad (12)$$

در رابطه فوق β ثابت رشد و Δy عمر تجهیزات الکترونیک قدرت است. دمای تجهیزات در حالت بهره‌برداری می‌بایست محاسبه شود و در حالت غیر بهره‌برداری دمای تجهیزات همان دمای T_A در نظر گرفته می‌شود. فاکتور شتاب‌دهنده نرخ سیکل دما نیمه‌های-ها بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pi_{CR} = \frac{CR}{CR_1} \quad (13)$$

در رابطه فوق CR تعداد سیکل‌های توان بهره‌برداری شده از مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت در یک سال می‌باشد و CR_1 ثابت ویژه تجهیزات الکترونیک قدرت می‌باشد. سیکل دمایی دلتا برای نیمه‌های-ها بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pi_{DT} = \left(\frac{T_{vj} - T_A}{DT_1} \right)^2 \quad (14)$$

که در رابطه فوق DT_1 پارامتر ثابت برای هر تجهیز است. فاکتورهای چرخه کار مربوط به شرایط بهره‌برداری و غیربهره‌برداری توسط روابط زیر تخمین زده می‌شوند.

$$\pi_{DCO} = \frac{1 - P_{non}}{DC_{10P}} \quad (15)$$

$$\pi_{DCN} = \frac{P_{non}}{DC_{1nonop}} \quad (16)$$

$$\pi_{DCO} = \frac{1 - P_{non}}{DC_{10P}} \quad (17)$$

$$\pi_{DCN} = \frac{P_{non}}{DC_{1nonop}} \quad (18)$$

که DC_{10P} و DC_{1nonop} پارامترهای ثابت مربوط به تجهیزات و P_{non} احتمال حالت‌هایی است که از ژنراتور القایی دو سو تغذیه بهره‌برداری نمی‌شود. لازم به ذکر است که نیمه هادی‌ها قابل تعمیر نیستند بلکه فقط تعویض می‌شوند. بنابراین منظور از زمان تعمیر مبدل‌ها به دلیل خرابی نیمه هادی‌ها، زمان جایگزینی این تجهیزات است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

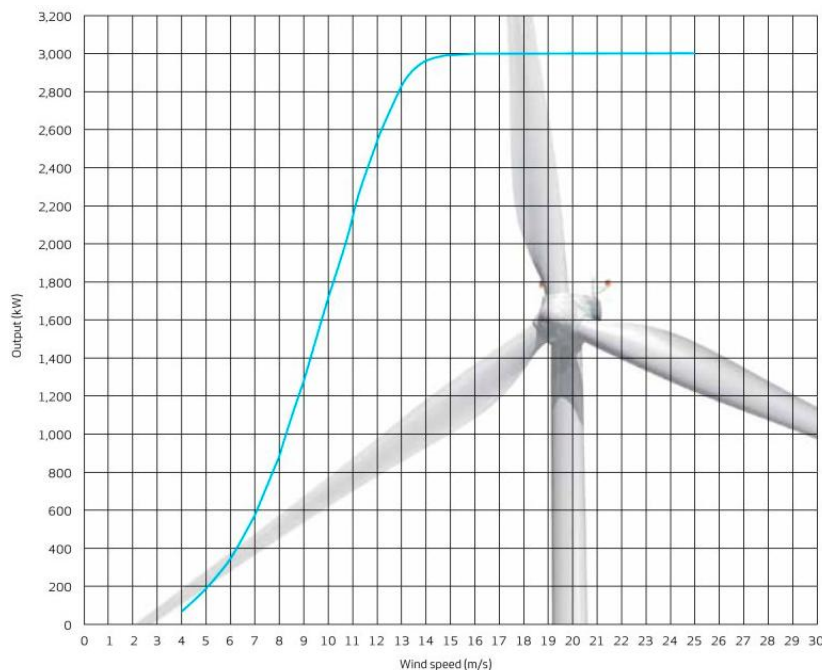
در این بخش تاثیر تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت پشت به پشت مورد استفاده در نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بطور کلی در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های بادی، دو جنبه باید در نظر گرفته شود. یکی اینکه اجزای تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها ممکن است دچار خرابی شوند و لذا بایستی تاثیر خرابی این اجزا بر خرابی کل نیروگاه بررسی گردد. دیگر اینکه به دلیل تغییر پارامترهای منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند سرعت باد، توان تولیدی این نیروگاه‌ها تغییر می‌کند و لذا این تغییرات توان نیز باید لحاظ گردد. این در حالی است که برای نیروگاه‌های غیرتجدیدپذیر تنها عامل اول در نظر گرفته می‌شود. زیرا در این نیروگاه‌ها توان خروجی قابل کنترل بوده و در زمانی که نیروگاه سالم است، میزان توان تولیدی با ظرفیت نامی نیروگاه برابر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های بادی دارای عدم قطعیت هستند. به این معنا که توان تولیدی آن‌ها در طول زمان تغییر می‌کند و نمی‌توان بطور دقیق پیش‌بینی نمود که در زمان مشخصی از آینده چه توانی را تولید می‌کنند. در این مقاله یک نیروگاه بادی مبتنی بر توربین بادی V90 با توان نامی ۳ مگاوات که توسط شرکت Vestas ساخته شده است مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه می‌باشد. در شکل ۶ ساختار این توربین بادی و در شکل ۷ منحنی توان توربین نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات کلی این نیروگاه شامل توان نامی، سرعت قطع پایین، سرعت نامی، سرعت قطع بالا و ولتاژ خروجی ژنراتور آورده شده است.



شکل (۶): توربین بادی Vestas90

در این قسمت سرعت چرخش روتور بر حسب سرعت باد محاسبه گردد. سرعت چرخش روتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه به ازای سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین صفر خواهد بود. با زیاد شدن سرعت باد و رسیدن به سرعت قطع پایین، روتور شروع به حرکت می‌کند و سرعت آن متناسب با سرعت باد افزایش می‌یابد. پس از اینکه سرعت باد به سرعت نامی رسید، روتور نیز به سرعت نامی می‌رسد و به ازای سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی سرعت چرخش روتور به کمک مکانیزم کنترلی در سرعت نامی ثابت نگه داشته می‌شود. این روند تا سرعت قطع بالا برقرار بوده و پس از آن به منظور جلوگیری از آسیب دیدن توربین، روتور متوقف می‌شود و بنابراین سرعت آن به ازای سرعت‌های باد بالاتر از سرعت قطع بالا صفر خواهد بود. در شکل ۸ نمودار سرعت چرخش روتور بر حسب سرعت باد نشان داده شده است. سپس می‌بایست میزان لغزش ژنراتور محاسبه گردد.

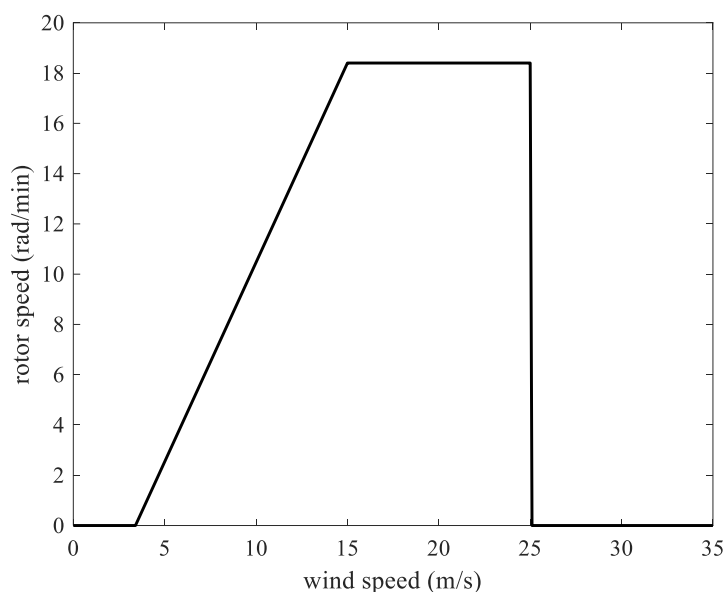
لغزش به صورت اختلاف بین سرعت سنکرون (سرعت میدان چرخان استاتور) و سرعت چرخش روتور می‌باشد که به صورت درصدی از سرعت سنکرون بیان می‌شود. در نیروگاه بادی مورد مطالعه مقدار سرعت سنکرون برابر با $13/6$ رادیان بر دقیقه در نظر گرفته شده است که متناظر با سرعت باد 12 متر بر ثانیه می‌باشد. نمودار لغزش ژنراتور القایی دو سو تغذیه بر حسب سرعت باد محاسبه شده و در شکل ۹ رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است در سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین که سرعت چرخش روتور صفر است مقدار لغزش ۱ می‌باشد. با زیاد شدن سرعت و رسیدن آن به مقدار سرعت قطع بالا، روتور شروع به حرکت می‌کند. با زیاد شدن سرعت باد، سرعت چرخش روتور نیز زیاد شده و لغزش شروع به کاهش می‌کند تا اینکه در سرعت باد متناظر با سرعت سنکرون ژنراتور، میزان لغزش صفر می‌شود. بنابراین میزان لغزش ژنراتور به ازای سرعت‌های باد بین $3/5$ متر بر ثانیه تا 12 متر بر ثانیه، به ترتیب بین ۱ تا ۰ خواهد بود. با زیاد شدن سرعت باد، سرعت چرخش روتور نیز افزایش یافته و لغزش منفی خواهد شد. بنابراین به ازای سرعت‌های باد بین سرعت متناظر با سرعت سنکرون (12 متر بر ثانیه) و سرعت نامی (15 متر بر ثانیه) مقدار لغزش از مقدار صفر کمتر شده و منفی می‌گردد. به ازای سرعت‌های باد بین 15 تا 25 متر بر ثانیه که سرعت چرخش روتور برابر با مقدار سرعت نامی روتور، ثابت نگه داشته می‌شود، میزان لغزش نیز در مقدار $-0/3488$ ثابت خواهد بود. با زیاد شدن سرعت باد و به ازای سرعت‌های باد بزرگتر از سرعت قطع بالا، توربین متوقف شده و سرعت روتور صفر خواهد بود، بنابراین در این شرایط میزان لغزش ۱ خواهد بود.



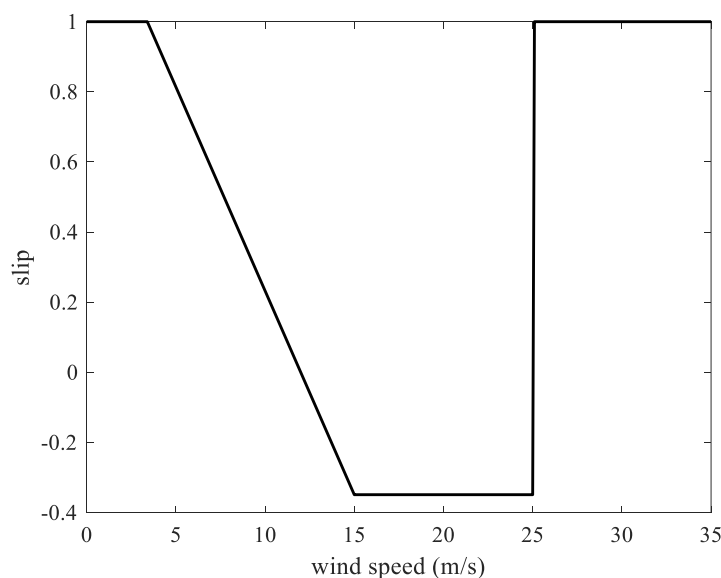
شکل (۷): منحنی توان توربین بادی Vestas90

جدول (۱): مشخصات نیروگاه‌های بادی Vestas90

پارامتر	مقدار
توان نامی	۳ مگاوات
سرعت قطع پایین	$3/5$ متر بر ثانیه
سرعت قطع بالا	25 متر بر ثانیه
سرعت نامی	15 متر بر ثانیه
ولتاژ خروجی ژنراتور	۱۰۰۰ ولت
نوع ژنراتور	القایی دو سو تغذیه
فرکانس برق تولیدی	۵۰ هرتز



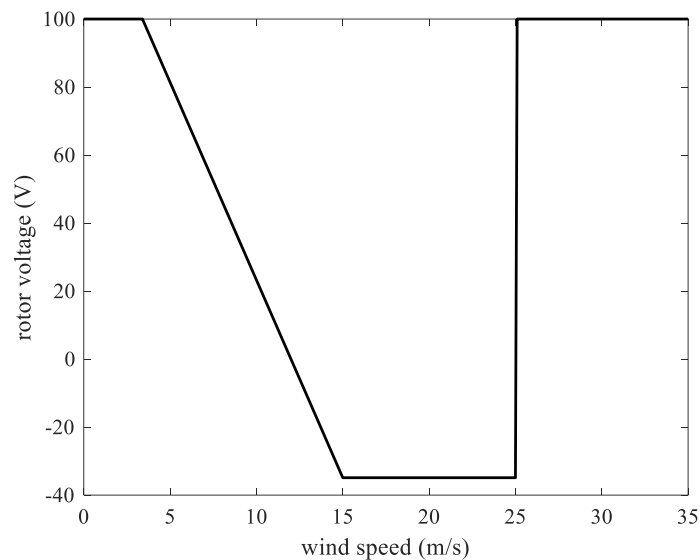
شکل (۸): نمودار سرعت چرخش روتور بر حسب سرعت باد



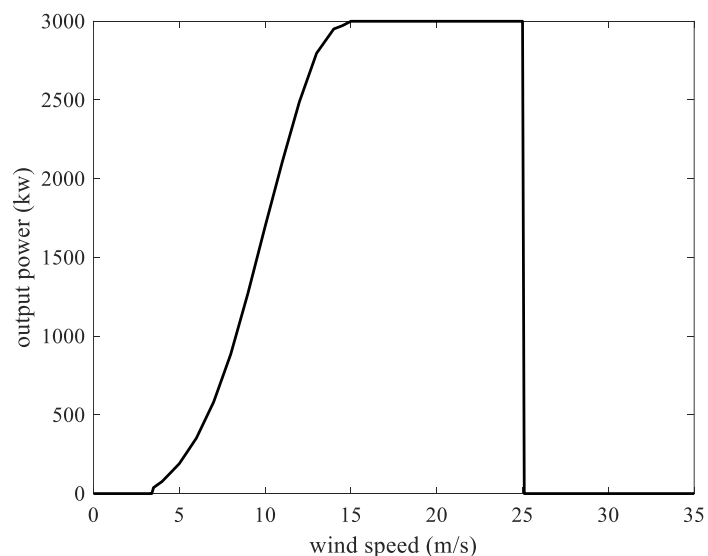
شکل (۹): نمودار لغزش بر حسب سرعت باد

در این مرحله با توجه به رابطه ولتاژ روتور، که برابر با حاصل ضرب لغزش (S) در نسبت تعداد دور سیم‌پیچ روتور به استاتور در ولتاژ استاتور می‌باشد، مقدار ولتاژ روتور محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه در توربین بادی مبتنی بر تکنولوژی Vestas90 ولتاژ استاتور در ژنراتور القایی دو سو تغذیه برابر ۱۰۰۰ ولت می‌باشد و نسبت تعداد دور سیم‌پیچ روتور به تعداد دور سیم‌پیچ استاتور نیز ۰/۱ در نظر گرفته شده است، ولتاژ روتور به ازای تغییرات سرعت باد تعیین شده و در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در شرایطی که توربین و روتور نمی‌چرخد، ولتاژ ۱۰۰ ولت در روتور القا می‌شود. در محدوده سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی، با زیاد شدن سرعت روتور، اختلاف بین سرعت سنکرون و سرعت روتور کاهش یافته و میزان القای ولتاژ در روتور به دلیل کاهش تغییرات شار، کاهش می‌یابد. با زیاد شدن سرعت روتور رسیدن به سرعت سنکرون، میزان القا صفر شده و ولتاژ القایی در روتور نیز صفر خواهد بود. با زیاد شدن سرعت چرخش روتور و فراتر رفتن آن از سرعت سنکرون، مقدار لغزش منفی شده و ولتاژ القایی نیز منفی خواهد شد. به ازای سرعت‌های بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا، سرعت چرخش روتور در مقدار سرعت نامی، ثابت نگه داشته شده و بر این اساس مقدار لغزش و در نتیجه ولتاژ القایی در روتور نیز ثابت خواهد بود. با افزایش سرعت باد، به ازای سرعت‌های باد بالاتر از سرعت قطع بالا، توربین

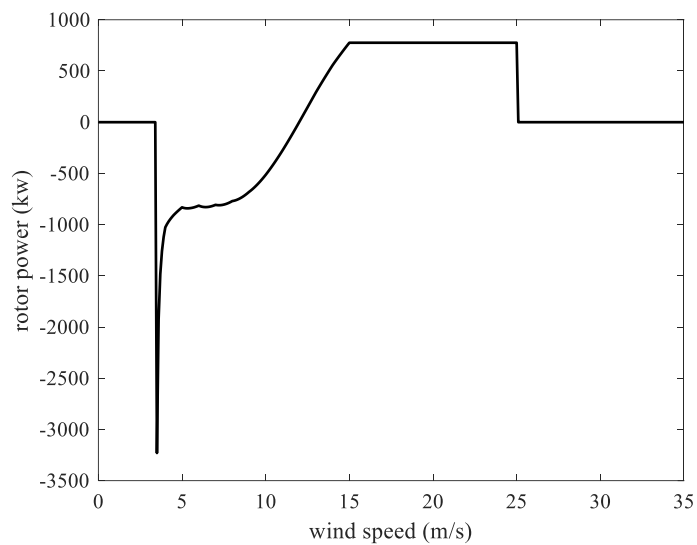
متوقف شده و لذا سرعت چرخش روتور نیز صفر شده و ولتاژ القایی در روتور ۱۰۰ ولت خواهد بود. حال به ازای سرعت‌های مختلف باد، میزان توان روتور و استاتور محاسبه می‌گردد. از کل توان خروجی ژنراتور القایی دو سو تغذیه، توان تولیدی روتور به نسبت $-S/(1-S)$ برابر و توان تولیدی در استاتور به نسبت $1/(1-S)$ برابر خواهد بود. با داشتن توان تولیدی توربین بادی (شکل ۱۱)، بر اساس این روابط، توان تولیدی روتور و استاتور به ازای سرعت‌های باد مختلف محاسبه شده و به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است. در شکل ۱۴ نیز برای مقایسه، بر روی یک نمودار هر دو توان روتور و استاتور نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است توان توربین، روتور و استاتور در سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین و بیشتر از سرعت قطع بالا صفر می‌باشند. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت قطع پایین و سرعت سنکرون، توان تولیدی روتور منفی و توان تولیدی استاتور مثبت می‌باشد و توان استاتور در این ناحیه صعودی است تا به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت سنکرون و سرعت نامی، توان روتور نیز مثبت شده و توان استاتور مثبت اما نزولی است. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا هم توان استاتور و هم توان روتور مثبت می‌باشد و توان خروجی از جمع این دو توان به دست می‌آید. با زیاد شدن سرعت باد و به ازای سرعت‌های باد بیشتر از سرعت قطع بالا، باز توربین متوقف شده و توان خروجی صفر خواهد بود.



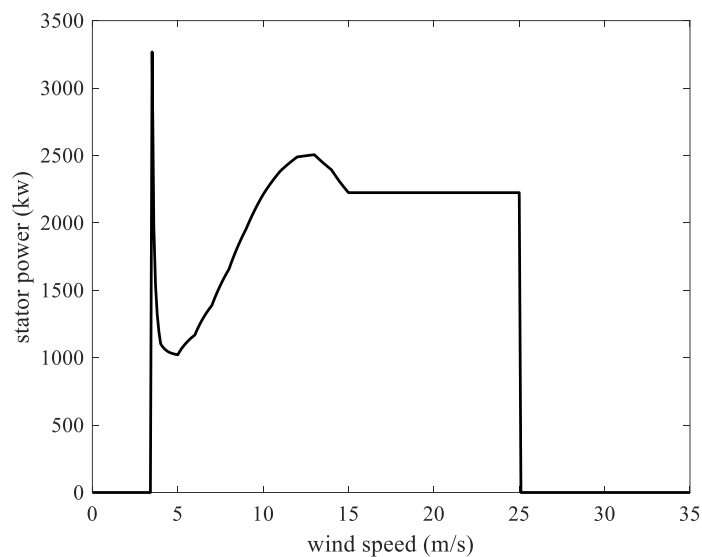
شکل (۱۰): نمودار ولتاژ روتور بر حسب سرعت باد



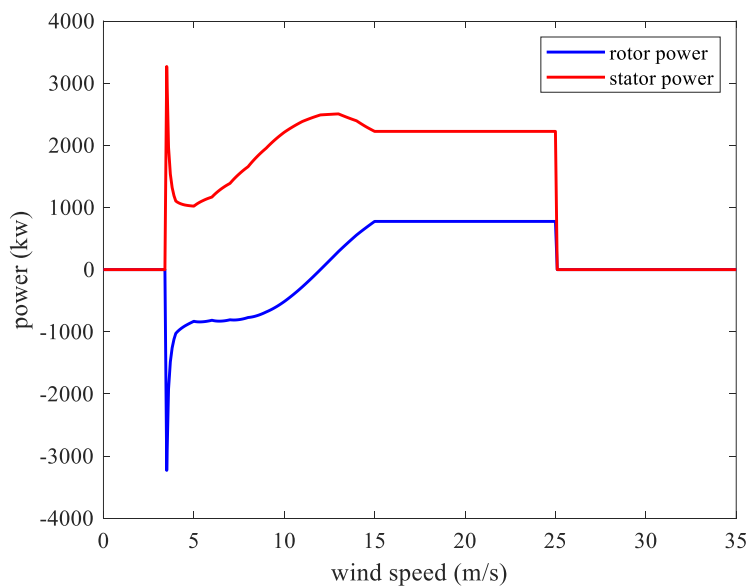
شکل (۱۱): نمودار توان خروجی ژنراتور القایی دو سو تغذیه بر حسب سرعت باد



شکل (۱۲): نمودار توان روتور بر حسب سرعت باد

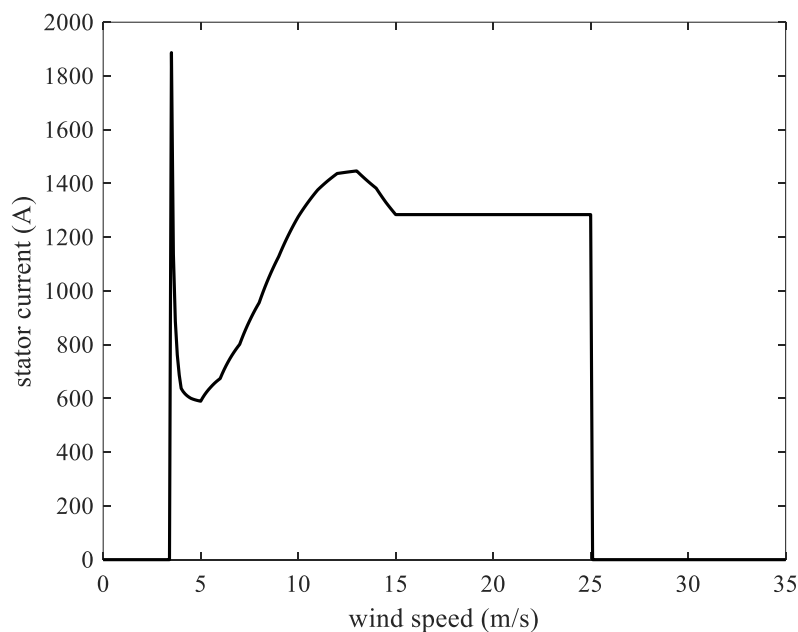


شکل (۱۳): نمودار توان استاتور بر حسب سرعت باد

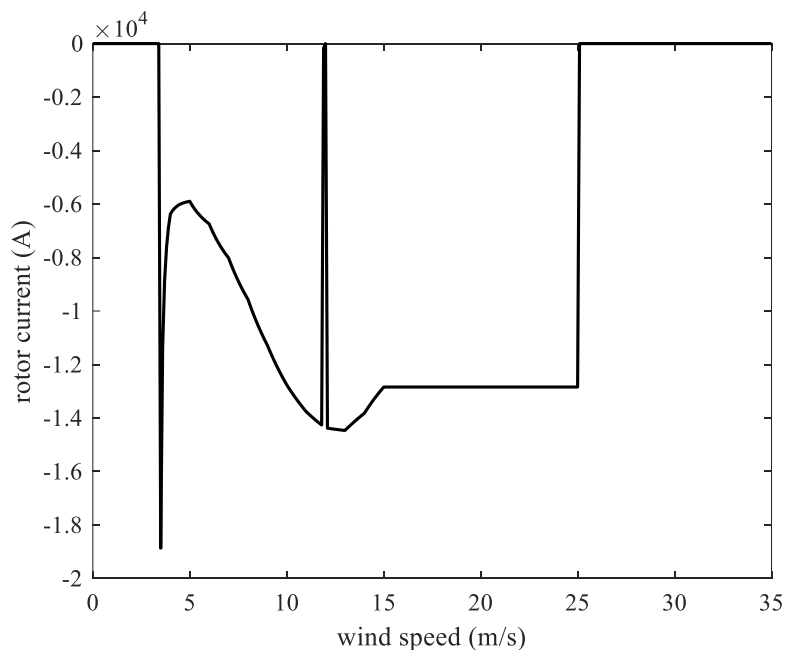


شکل (۱۴): نمودار توان روتور و استاتور بر حسب سرعت باد

در این مرحله، با توجه به توان‌های روتور و استاتور و همچنین ولتاژهای روتور و استاتور، در سرعت‌های باد مختلف جریانی که در سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور جاری می‌شود محاسبه می‌گردد. در شکل ۱۵ جریان استاتور و در شکل ۱۶ جریان روتور نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشخص است شکل موج جریان استاتور شبیه توان تولیدی استاتور می‌باشد؛ چرا که ولتاژ استاتور مقدار ثابت ۱۰۰۰ ولت می‌باشد. اما در مورد جریان روتور به دلیل اینکه ولتاژ روتور تغییر می‌کند شکل موج جریان روتور متفاوت با توان روتور خواهد بود. همچنین همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشخص است زمانی که سرعت چرخش روتور با سرعت سنکرون برابر می‌شود القایی در روتور اتفاق نمی‌افتد و لذا جریان روتور صفر خواهد بود. همچنین به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین و بالاتر از سرعت قطع بالا که توربین بادی متوقف است توان خروجی واحد بادی، توان استاتور و توان روتور صفر خواهد بود که سبب می‌شود جریان روتور و استاتور نیز در این سرعت‌های باد صفر باشد.

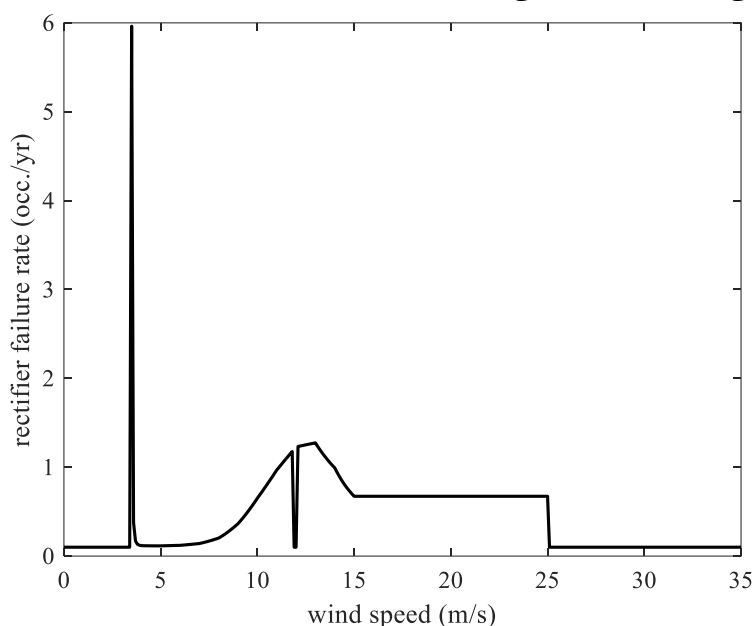


شکل (۱۵): نمودار جریان استاتور بر حسب سرعت باد



شکل (۱۶): نمودار جریان روتور بر حسب سرعت باد

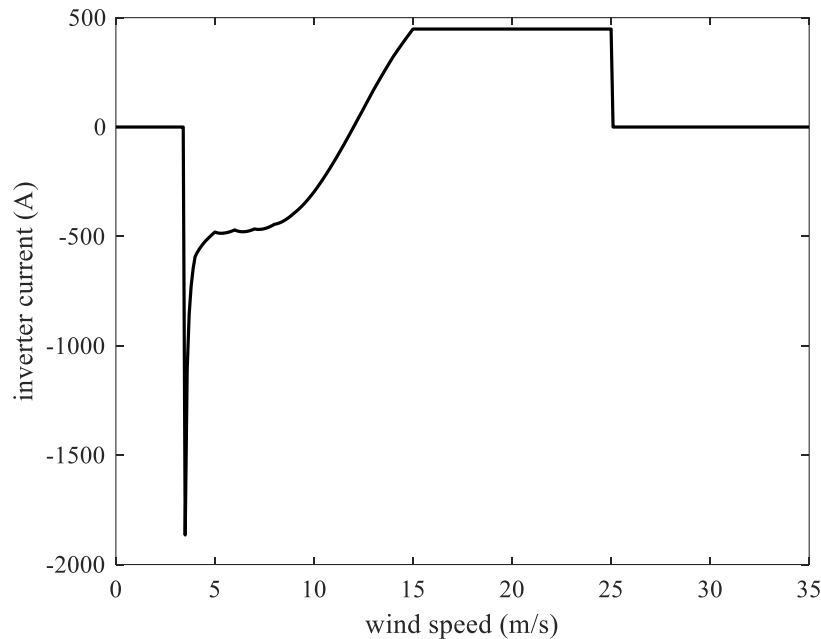
یکسوساز متصل به روتور بوده و بنابراین جریان فازهای یکسوساز همان جریان فاز روتور می‌باشد. بر همین اساس با توجه به روابط بیان شده در قبل نرخ خرابی یکسوساز بر حسب سرعت‌های باد مختلف محاسبه شده و در شکل ۱۷ رسم شده است. همان‌گونه که مشخص است به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین و بیشتر از سرعت قطع بالا که توان تولیدی و در نتیجه جریان روتور صفر است و همچنین در سرعت سنکرون که القا اتفاق نمی‌افتد و جریان روتور صفر است، نرخ خرابی در مقدار مینیمم می‌باشد. با زیاد شدن سرعت باد ابتدا نرخ خرابی افزایش می‌یابد و سپس کاهش یافته و در سرعت نامی به یک مقدار ثابت می‌رسد و به دلیل ثابت بودن سرعت چرخش روتور در محدوده بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا، چون جریان روتور ثابت است نرخ خرابی یکسوساز نیز ثابت می‌باشد.



شکل (۱۷): نمودار نرخ خرابی یکسوساز بر حسب سرعت باد

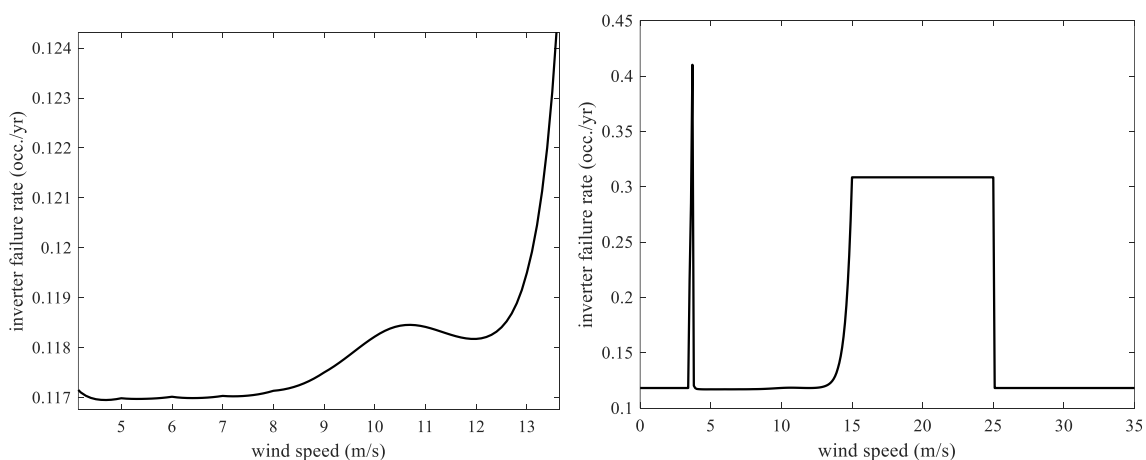
به منظور تعیین نرخ خرابی اینورتر، در مرحله اول لازم است که جریان فازهای اینورتر به دست آورده شود. با توجه به توان روتور و بر اساس ولتاژ اینورتر که برابر با ولتاژ خروجی ژنراتور و استاتور یعنی ۱۰۰۰ ولت می‌باشد، مقدار جریان اینورتر محاسبه و بر حسب سرعت باد در شکل ۱۸ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در شرایطی که روتور ساکن است و نمی‌چرخد به دلیل اینکه توان ژنراتور و جریان القایی در روتور صفر می‌باشد، جریان اینورتر نیز صفر می‌باشد. در سرعت‌های باد بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی که سرعت چرخش روتور در حال افزایش است، جریان اینورتر نیز صعودی بوده و به ازای سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا که سرعت چرخش روتور ثابت است، جریان القایی در روتور و در نتیجه جریان اینورتر نیز ثابت می‌باشد. به کمک روابط بیان شده در قبل، نرخ خرابی اینورتر نیز محاسبه شده و بر حسب سرعت باد در شکل ۱۹ رسم شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۹ و شکل بزرگنمایی شده آن نشان داده شده است، با زیاد شدن سرعت باد و فراتر رفتن آن از مقدار سرعت قطع بالا، نرخ خرابی اینورتر شروع به افزایش کمی می‌نماید. تا اینکه به سرعت سنکرون می‌رسد. به ازای سرعت‌های بالاتر از سرعت سنکرون، سرعت افزایش نرخ خرابی اینورتر زیاد شده و افزایش نرخ خرابی شدیدتر می‌باشد تا اینکه سرعت باد به سرعت نامی می‌رسد. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا، نرخ خرابی اینورتر نیز ثابت می‌شود، به این دلیل که در این محدوده سرعت چرخش روتور، توان القایی در روتور، جریان روتور و در نتیجه جریان عبوری از اینورتر ثابت می‌باشد. به ازای سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین و همچنین بیشتر از سرعت قطع بالا نیز نرخ خرابی اینورتر در مقدار مینیمم قرار دارد، زیرا در این محدوده توان ژنراتور و در نتیجه توان روتور و جریان اینورتر صفر می‌باشد.

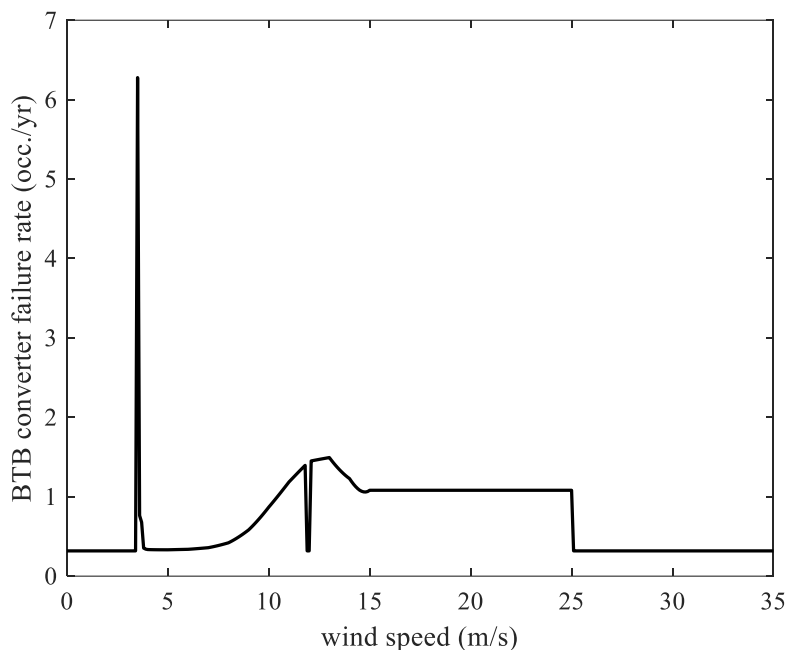


شکل (۱۸): نمودار جریان اینورتر بر حسب سرعت باد

حال می‌توان نرخ خرابی مبدل پشت به پشت را نیز محاسبه نمود. در مبدل پشت به پشت که از یکسوساز، لینک dc و اینورتر تشکیل شده است، با خراب شدن هر کدام از این تجهیزات عملکرد مبدل پشت به پشت دچار مشکل شده و بنابراین از نقطه نظر قابلیت اطمینان این سه تجهیز با هم سری هستند. بنابراین نرخ خرابی مبدل پشت به پشت از مجموع نرخ خرابی این سه تجهیز به دست می‌آید. در این تحقیق نرخ خرابی لینک dc نیز برابر با $0/1$ خرابی در سال در نظر گرفته شده است. بنابراین نرخ خرابی مبدل پشت به پشت به ازای سرعت‌های باد مختلف محاسبه شده و در شکل ۲۰ رسم شده است. همان‌گونه که مشخص است نرخ خرابی مبدل پشت به پشت به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین و بیشتر از سرعت قطع بالا مقداری ثابت داشته و به دلیل اینکه در این شرایط در روتور جریانی القا نمی‌شود مقدار نرخ خرابی مینیمم است. با زیاد شدن سرعت باد و فراتر رفتن از سرعت قطع پایین کم‌کم نرخ خرابی مبدل پشت به پشت افزایش می‌یابد. این افزایش ابتدا کم و سپس شدت می‌گیرد تا اینکه به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. سپس نرخ خرابی شروع به کاهش کرده و در محدوده سرعت‌های بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا نیز به دلیل ثابت بودن سرعت روتور و همچنین ثابت ماندن القا، مقداری ثابت خواهد داشت.



شکل (۱۹): نمودار نرخ خرابی اینورتر بر حسب سرعت باد و نمودار بزرگنمایی شده آن



شکل (۲۰): نمودار نرخ خرابی مبدل پشت به پشت بر حسب سرعت باد

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل فرکانس مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تجهیزات مهم این مبدل‌های فرکانس شامل یکسوساز، لینک dc و اینورتر معرفی شدند. سپس اثر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی این تجهیزات مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین نرخ خرابی مبدل پشت به پشت، اثر تغییر دما بر نیمه‌هادی‌های تشکیل دهنده این مبدل‌ها یعنی دیودها و کلیدها در نظر گرفته شد. ابتدا با تغییر سرعت باد، جریان عبور از این نیمه‌هادی‌ها تعیین و سپس میزان افزایش دمای ناشی از تلفات این جریان‌ها در این المان‌های الکترونیک قدرت محاسبه شد. در پایان نیز به کمک قاتون آرسنیوس، نرخ خرابی این تجهیزات محاسبه گردید. به منظور مطالعه اثر تغییرات سرعت باد بر قابلیت اطمینان مبدل فرکانس مورد استفاده در نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه، یک واحد بادی مبتنی بر توربین بادی Vestas90 با توان ۳ مگاوات در نظر گرفته شد. با داشتن روابط مربوط به نرخ خرابی تجهیزات واحد بادی بر حسب سرعت باد، نرخ خرابی معادل مبدل فرکانس بر حسب سرعت باد تعیین گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت زیر آورده شده است: نرخ خرابی مبدل فرکانس مورد استفاده در نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه به سرعت باد وابسته است و لذا در مطالعه دقیق قابلیت اطمینان، تغییرات سرعت باد باید لحاظ شود. شکل موج نرخ خرابی مبدل پشت به پشت با منحنی توان توربین تفاوت دارد. این امر به این دلیل است که نرخ خرابی این تجهیزات به جریان القایی در روتور نیز بستگی دارد که جریان القایی در روتور در نواحی مختلف کارکرد ماشین القایی متفاوت است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسنده از آقای دکتر امیر قاضی، دانشیار مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز شبیه‌سازی تشکر و قدردانی می‌نماید.

References

مراجع

- [1] N. Nguyen, S. Almasabi, and J. Mitra, "Impact of correlation between wind speed and turbine availability on wind farm reliability," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 55, pp. 2392-2400, Mar. 2019.
- [2] K. Fischer et al., "Reliability of power converters in wind turbines: Exploratory analysis of failure and operating data from a worldwide turbine fleet," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, pp. 6332-6344, Dec. 2018.

- [3] D. Zhou, G. Zhang, F. Blaabjerg, "Optimal selection of power converter in DFIG wind turbine with enhanced system-level reliability," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 54, pp. 3637-3644, Apr. 2018.
- [4] D. Zhou, F. Blaabjerg, "Converter-level reliability of wind turbine with low sample rate mission profile," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 56, pp. 2938-2944, Mar. 2020.
- [5] N. Nguyen, J. Mitra, "Reliability of power system with high wind penetration under frequency stability constraint," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, pp. 985-994, Jan. 2017.
- [6] J. Li et al., "A Hybrid Cable Connection Structure for Wind Farms With Reliability Consideration," *IEEE Access*, pp. 144398-144407, Aug. 2019.
- [7] C. Dao, B. Kazemtabrizi, C. Crabtree, "Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy," *Wind Energy*, vol. 22, pp. 1848-1871, Dec. 2019.
- [8] H. Arabian-Hoseynabadi, H. Oraee, P. J. Tavner, "Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, pp. 817-824, Jun. 2010.
- [9] H. Arabian-Hoseynabadi, P. J. Tavner, H. Oraee, "Reliability comparison of direct-drive and geared-drive wind turbine concepts," *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, vol. 13, pp. 62-73, Jan. 2010.
- [10] A. Ghaedi et al., "Toward a comprehensive model of large-scale DFIG-based wind farms in adequacy assessment of power systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, pp. 55-63, Jan. 2013.
- [11] M. Liu et al., "Reliability evaluation of a tidal power generation system considering tidal current speeds," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, pp. 3179-3188, Apr. 2015.
- [12] M. Liu et al., "Reliability evaluation of tidal and wind power generation system with battery energy storage," *J. Modern Power Syst. Clean Energy*, vol. 4, pp. 636-647, Mar. 2016.
- [13] J. Carroll, A. McDonald, D. McMillan, "Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, pp. 663-670, Feb. 2014.
- [14] K. Benyahia, L. Boumediene, A. Mezouar, "Reliability and performance improvement of double-fed induction generator-based wind energy conversion system," *Int. J. Model. Ident. Control*, vol. 28, pp. 370-382, Apr. 2017.
- [15] L. A. A. Elhmoud, "Reliability improvement of DFIG-based wind energy conversion systems by real time control," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Michigan State Univ., East Lansing, MI, 2015.
- [16] M. K. Malakar, P. Tripathy, "Review on Wind Power Generation With Doubly Fed Induction Generator," in *20th national power system conference*, National Institute of Technology Trichy, 2018.
- [17] X. Chen et al., "Bearing Corrosion Failure Diagnosis of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines Based on Stator Current Analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, pp. 3419-3430, May 2019.
- [18] N. Jabbour et al., "A highly effective Fault-Ride-Through strategy for a wind energy conversion system with a doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, pp. 8154-8164, Aug. 2020.
- [19] F. Cheng et al., "Fault diagnosis of wind turbine gearboxes based on DFIG stator current envelope analysis," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, pp. 1044-1053, Mar. 2018.
- [20] K. Ni et al., "Highly reliable back-to-back power converter without redundant bridge arm for doubly fed induction generator-based wind turbine," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 55, pp. 3024-3036, Mar. 2019.