Journal of Systems Smartening and Data Processing
Vol. 1 - No. 2 – Summer 2023

Reliability Analysis of Transformer Considering Current Variation

Alireza Alesaadi[1], Reza Ghafouri[1], Mohammad Mehdi Ghanbarian[1]

[1]Department of Electrical and Computer Engineering, Kazeroun Branch, Islamic Azad University, Kazeroun, Iran
alesaadi@iau.ac.ir
reza.ghafouri@iau.ac.ir
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

Received: 20 August 2023 **Revised:** 22 September 2023 **Accepted:** 26 September 2023

Abstract:

The power transformer is used as one of the important equipment of this system to change the voltage level. The price of this equipment is high and in case of breakdown and interruption of electric power, a lot of damage is done to the network. In this paper, the reliability of power transformers is investigated and the effect of changes in the current passing through the coils on the reliability of this equipment is studied. The effect of current change in power transformers is more important for power plants whose electric current has many changes. In recent years, power plants based on renewable energy sources have been built and these power plants have variable production capacity due to changing weather conditions. For example, in wind power plants due to the change in wind speed, in tidal power plants due to the change in tidal height, and in current-type tidal power plants due to the change in the speed of tidal currents, the production power of the power plant varies and therefore with the change in power production of the power plant, the electric current is also variable and the failure rate of the transformer will also change, which must be checked. Based on this, in this paper, by extracting the relationships related to the dependence of the production power of wind power plants on wind speed, reservoir-type tidal power plants on tidal height, and tidal current power plants on the speed of tidal currents, the failure rate of transformers used in these power plants is studied. To show how the failure rate of the transformer changes, the simulation is done in the MATLAB software environment.

Keywords: transformer, failure rate, reliability, barrage-type tidal plant, current-type tidal plant, wind plant.

Corresponding Author: Reza Ghafouri
Corresponding Author Address: Department of Electrical and Computer Engineering, Kazeroun Branch, Islamic Azad University, Kazeroun, Iran.

ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور با در نظر گرفتن تغییرات جریان الکتریکی

علیرضا آل سعدی[۱]، رضا غفوری[۱]، محمدمهدی قنبریان[۱]

۱- گروه برق - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
alesaadi@iau.ac.ir
reza.ghafouri@iau.ac.ir
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹ **تاریخ بازنگری مقاله:** ۱۴۰۲/۰۶/۳۱ **تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

چکیده: ترانسفورماتور قدرت به عنوان یکی از تجهیزات مهم این سیستم، به منظور تغییر سطح ولتاژ استفاده می‌شود. قیمت این تجهیزات زیاد بوده و در صورت خراب شدن و قطع شدن توان الکتریکی، خسارت زیادی به شبکه وارد می‌شود. در این مقاله قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت مورد بررسی قرار گرفته و اثر تغییرات جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها بر قابلیت اطمینان این تجهیزات مطالعه می‌شود. اثر تغییر جریان در ترانسفورماتورهای قدرت بیشتر برای نیروگاه‌هایی مطرح است که جریان الکتریکی آن‌ها تغییرات زیادی دارند. در سال‌های اخیر نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر ساخته شده‌اند و این نیروگاه‌ها به دلیل تغییر شرایط آب و هوایی توان تولیدی متغیری دارند. به عنوان نمونه در نیروگاه‌های بادی به دلیل تغییر سرعت باد، در نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی به دلیل تغییر ارتفاع جزرومد و در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی به دلیل تغییر سرعت جریان‌های جزرومدی، توان تولیدی نیروگاه متغیر است و بنابراین با تغییر توان تولیدی نیروگاه، جریان الکتریکی نیز متغیر بوده و نرخ خرابی ترانسفورماتور نیز تغییر خواهد کرد که باید بررسی گردد. بر همین اساس در این مقاله سعی می‌شود با استخراج روابط مربوط به وابستگی توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به سرعت باد، نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی به ارتفاع جزرومد و نیروگاه‌های جریانی جزرومدی به سرعت جریان‌های جزرومدی، نرخ خرابی ترانسفورماتورهای به کاررفته در این نیروگاه‌ها را مطالعه نمود. برای نشان دادن چگونگی تغییر نرخ خرابی ترانسفورماتور، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب انجام می‌شود.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور، نرخ خرابی، قابلیت اطمینان، نیروگاه بادی، نیروگاه جزرومدی مخزنی، نیروگاه جزرومدی جریانی

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا غفوری
نشانی نویسنده‌ی مسئول: شهرستان کازرون- دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون

۱- مقدمه

به منظور تولید، انتقال و توزیع برق لازم است که سطح ولتاژ چندین بار تغییر کند که این کار توسط ترانسفورماتورها انجام می‌شود. بنابراین ترانسفورماتور یکی از تجهیزات اساسی در سیستم قدرت محسوب می‌شود و به دلیل تغییر سطح ولتاژ تعداد زیادی ترانسفورماتور در شبکه قدرت وجود دارد. از طرف دیگر ترانسفورماتورهای قدرت از جمله تجهیزات گران قیمت سیستم قدرت به حساب می‌آیند و بنابراین خراب شدن این تجهیزات می‌تواند خسارت زیادی به شبکه قدرت وارد کند. با توجه به اهمیت ترانسفورماتورها در شبکه قدرت بایستی قابلیت اطمینان این تجهیزات بررسی گردد و سعی شود این تجهیزات از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشند تا خراب نشوند. بنابراین مطالعه نرخ خرابی ترانسفورماتورها دارای اهمیت می‌باشد که در این تحقیق این موضوع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر اساس قانون آرسنیوس نرخ خرابی عایق‌ها، نیمه‌هادی‌ها و ... با زیاد شدن دما، افزایش می‌یابد. بنابراین بایستی دمای ترانسفورماتور در شرایط مختلف مشخص گردد تا بتوان نرخ خرابی آن را بطور دقیق بدست آورد. دمای عایق ترانسفورماتور در نتیجه تلفاتی که در ترانسفورماتور وجود دارد افزایش می‌یابد و تلفات ترانسفورماتور نیز به جریان الکتریکی عبوری از سیم‌پیچ‌ها وابسته است. بنابراین نتیجه می‌گیریم به منظور تعیین نرخ خرابی ترانسفورماتور بایستی جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور در شرایط مختلف تعیین گردد.

در سال‌های اخیر به دلیل مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی و با توجه به ضرورت کاهش تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای که سبب گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی می‌گردند، استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر در سیستم قدرت به منظور تولید برق افزایش یافته است. بر همین اساس نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، جزرومدی، امواج و ... در کشورهای مختلف دنیا توسعه یافته‌اند. توان تولیدی این نیروگاه‌ها وابسته به شرایط آب و هوایی است. به عنوان نمونه در نیروگاه‌های بادی، توان تولیدی نیروگاه به سرعت باد، در نیروگاه‌های خورشیدی توان تولیدی نیروگاه به تابش خورشید، در نیروگاه‌های امواج، توان تولیدی نیروگاه به ارتفاع و دوره تناوب موج، در نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی توان تولیدی نیروگاه به ارتفاع جزرومد، در نیروگاه‌های جزرومدی جریانی توان تولیدی نیروگاه به سرعت جریان‌های جزرومدی، در نیروگاه‌های آبی جریانی توان تولیدی نیروگاه به دبی آب رودخانه، در نیروگاه حرارتی اقیانوس توان تولیدی نیروگاه به دمای سطح آب و در نیروگاه‌های آبی توان تولیدی نیروگاه به هد آب وابسته است. بنابراین به دلیل اینکه این پارامترها در طول زمان تغییر می‌کنند، توان تولیدی نیروگاه نیز در طول زمان تغییر می‌کند. با تغییر توان تولیدی نیروگاه، جریان خروجی نیروگاه نیز تغییر کرده که این جریان از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورهای متصل به این نیروگاه‌ها عبور می‌کند. بنابراین نرخ خرابی ترانسفورماتورهایی که در نیروگاه‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شوند تغییرات بیشتری خواهد داشت و به همین دلیل در این مقاله، نرخ خرابی ترانسفورماتورهایی که در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این بخش، مقالاتی که در زمینه مطالعه قابلیت اطمینان ترانسفورماتور و نرخ خرابی متغیر تحقیقاتی انجام داده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. در [1] مدل قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت در شرایطی که سیستم خنک کننده آن به صورت جریان طبیعی روغن و جریان طبیعی هوا باشد مورد مطالعه قرار گرفته است. در [2] قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن مدل مارکوف ۵ حالته بدست آورده شده است. در این مدل احتمال حالت‌های خرابی، تعمیرات – نگهداری، اضافه بار و خروج به دست آورد شده است. با در نظر گرفتن حالت‌های بیشتر در مدل قابلیت اطمینان ترانسفورماتور، ریسک خرابی و عملیات تعمیرات – نگهداری بهتر تخمین زده می‌شود. در [3] آنالیز قابلیت اطمینان یک ترانسفورماتور قدرت ۲۲۰ کیلوولتی در کشور مصر انجام شده است. در این مقاله نمودار وانی شکل ترانسفورماتور قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در [4] ارزیابی ترانسفورماتورهای قدرت را بر اساس داده‌های آماری انجام داده است. در این مقاله اغتشاشاتی که در ترانسفورماتورهای قدرت در سال ۲۰۰۴ اتفاق افتاده است و مربوط به ترانسفورماتورهای قدرت با سطح ولتاژ ۱۱۰ کیلوولت، ۲۲۰ کیلوولت و ۳۸۰ کیلوولت می‌باشد، بررسی شده است. در [5] مدلسازی قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ انجام شده است. در این مقاله مکانیزم خرابی سیستم عایق سیم‌پیچ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [6] بیان شده است که قابلیت اطمینان شبکه برق به عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت بستگی دارد و ماده خنک کننده ترانسفورماتور تاثیر زیادی بر قابلیت اطمینان آن دارد. آلودگی‌ها و آب برای ترانسفورماتور مضر می‌باشند و سبب کاهش قابلیت اطمینان آن می‌شوند. در

[7] آنالیز قابلیت اطمینان برای سیستم عایقی به کار رفته در ترانسفورماتورهای نوع خشک صورت گرفته است. سیستم عایقی ترانسفورماتورهای نوع خشک تحت تاثیر استرس‌های حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و محیطی می‌باشند که سبب فرسودگی و کاهش استقامت عایقی آن‌ها و در نتیجه خرابی آن‌ها می‌شود. در این مقاله روشی معرفی می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم عایقی ترانسفورماتور نوع خشک را بر اساس سه مدل فرسودگی، رگراسیون و قضاوت خبره بررسی می‌کند. این سه مدل بر اساس پارامترهای کیفیت به دست آمده از تست‌های آزمایشگاهی به تخمین پارامترهای قابلیت اطمینان می‌پردازد. در [8] تاثیر خرابی مرتبط با عمر ترانسفورماتور قدرت بر قابلیت اطمینان این تجهیز مورد مطالعه قرار رفته است. ابتدا مدل خرابی دوره پایان عمر ترانسفورماتور تعیین شده است تا بتوان تاثیر شرایط بارگذاری مختلف را بررسی نمود. سپس توزیع احتمال وایبال – آرسنیوس که تاثیر استرس حرارتی را بر خرابی پایان عمر ترانسفورماتور نشان می‌دهد با مدل توزیع احتمال گوسی مقایسه شده است. یک آنالیز حساسیت نیز انجام شده است تا تاثیر عدم قطعیت‌ها بر پارامترهای مدل را ارزیابی نماید. در [9] یک مدل وابسته به شرایط برای خروجی‌های ترانسفورماتور به دست آورده شده است تا قابلیت اطمینان این تجهیز را ارزیابی نماید. با توجه به اینکه در نظر گرفتن نرخ خرابی ثابت نمی‌تواند شرایط مختلف بهره‌برداری ترانسفورماتور نظیر تاثیر میزان بار ترانسفورماتور، دمای محیط و شرایط آب و هوایی را در نظر بگیرد، در این مقاله یک مدل وابسته به شرایط برای خروجی‌های ترانسفورماتور ارائه شده است. در این مقاله، سه مدل خرابی شامل خرابی‌های ناشی از فقدان استقامت مکانیکی عایق‌ها، خرابی‌های تصادفی که شرایط آب و هوایی را لحاظ می‌کند و خروجی‌های ناشی از تریپ مستقیم حفاظت اضافه بار پیشنهاد شده است. قابلیت اطمینان ترانسفورماتور بر اساس روش پیشنهادی در شرایط مختلف بهره‌برداری به دست آورده شده است. در [10] ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی و جزرومدی نوع جریانی با در نظر گرفتن اثر تغییر توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و جزرومدی نوع جریانی بر نرخ خرابی مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده شده در این نیروگاه‌ها صورت گرفته است. در [11] قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی جریانی با در نظر گرفتن اثر تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نیروگاه جزرومدی نوع جریانی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه در نظر گرفته شده است. در [12] قابلیت اطمینان یک ریزشبکه جزیره‌ای و جدا از شبکه با در نظر گرفتن نرخ خرابی متغیر برای تجهیزات الکترونیک قدرت مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به موضوع این تحقیق که در زمینه بررسی تاثیر تغیر جریان الکتریکی بر نرخ خرابی ترانسفورماتورهای به کار رفته در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی است، این مقاله به صورت زیر سازمان یافته است: در بخش دوم ترانسفورماتورهای نصب شده در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی مخزنی و جزرومدی جریانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قابلیت اطمینان و روابط مربوط به نرخ خرابی ترانسفورماتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی مخزنی و جزرومدی جریانی در بخش سوم آورده می‌شود. بخش چهارم شبیه‌سازی و نتایج آن و در بخش پنجم نتیجه‌گیری تحقیق آورده می‌شود.

۲- ترانسفورماتور قدرت

در شبکه قدرت به منظور تبدیل سطح ولتاژ از ترانسفورماتور استفاده می‌شود. ترانسفورماتور به منظور تبدیل سطح ولتاژ از یک هسته مغناطیسی تشکیل شده است که به دور آن سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه پیچیده شده است. زمانی که یک منبع ولتاژ ac به سیم‌پیچ اولیه اعمال می‌گردد جریان الکتریکی در سیم‌پیچ اولیه جاری می‌شود. این جریان یک میدان مغناطیسی ایجاد کرده و در نتیجه شار مغناطیسی ایجاد می‌شود. به دلیل کم بودن مقاومت مغناطیسی هسته، شار مغناطیسی تولیدی سیم‌پیچ اولیه از هسته گذشته و به سیم‌پیچ ثانویه می‌رسد. با توجه به اینکه منبع ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ اولیه ac است شار مغناطیسی تولیدی نیز ac بوده و در طول زمان تغییر می‌کند. این شار طبق قانون القای فارادی زمانی که از سیم‌پیچ ثانویه می‌گذرد سبب القای ولتاژ در سیم‌پیچ ثانویه می‌گردد. ولتاژی که در هر سیم‌پیچ القا می‌شود به تعداد دور سیم‌پیچ بستگی دارد. بنابراین نسبت ولتاژهای ثانویه به اولیه در ترانسفورماتور به نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌های ثانویه به اولیه وابسته است.

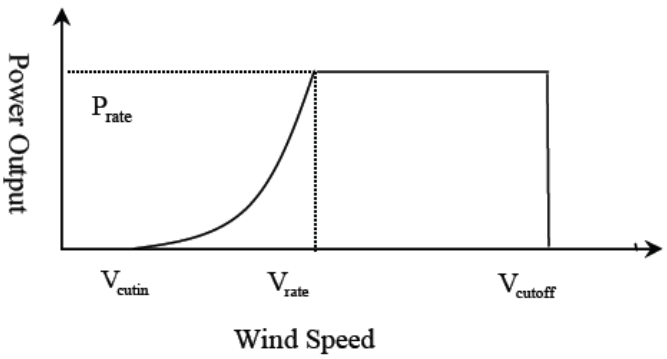
بطور کلی دو نوع ترانسفورماتور وجود دارد. یکی ترانسفورماتور نوع روغنی است که عایق آن از روغن می‌باشد. در این نوع ترانسفورماتورها روغن علاوه بر وظیفه عایقی وظیفه خنک نمودن سیم‌پیچ‌ها را نیز بر عهده دارد. نوع دوم ترانسفورماتورها ترانسفورماتور نوع خشک می‌باشد که عایق سیم‌پیچ‌ها از رزین ریختگی می‌باشد. با توجه به اینکه عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها سبب گرم شدن سیم‌پیچ می‌گردد بایستی سیم‌پیچ خنک گردد و به همین خاطر سیستم خنک کننده در ترانسفورماتور وجود دارد. گرمایی که در ترانسفورماتور ایجاد می‌شود ناشی از تلفات اهمی سیم‌پیچ‌ها و گرمای ناشی از تلفات هسته می‌باشد. با توجه به اینکه تلفات هسته به ولتاژ ترانسفورماتور وابسته است با تغییر جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها این تلفات تغییر چندانی نمی‌کند. اما تلفات اهمی یا تلفات مسی به مجذور جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها وابسته هستند و در صورتی که جریان عبوری از ترانسفورماتور تغییر کند این تلفات نیز تغییر کرده و بنابراین حرارت ایجاد شده در ترانسفورماتور نیز تغییر می‌کند. بر همین اساس دمای ترانسفورماتور تغییر کرده و نرخ خرابی ترانسفورماتور تغییر خواهد کرد. در این مقاله این تغییرات بررسی می‌شود. در سال‌های اخیر ترانسفورماتورها کاربرد زیادی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر داشته‌اند. کشورهای مختلف جهان به دلیل اینکه سوخت‌های فسیلی سبب آلودگی محیط زیست می‌گردد به سمت استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر روی آورده‌اند و بر این اساس نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، جزرومدی و امواج توسعه یافته‌اند. در این نیروگاه‌ها توان تولیدی نیروگاه متغیر بوده و بنابراین جریان خروجی نیروگاه که از ترانسفورماتور می‌گذرد نیز متغیر خواهد بود. بنابراین نرخ خرابی ترانسفورماتورهایی که در این نیروگاه‌ها نصب می‌گردند نیز متغیر می‌باشد. در ادامه این بخش سه نیروگاه بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۲- نیروگاه بادی

زمانی که یک توده هوا که در نتیجه وزش باد جابه‌جا می‌شود با سرعت v، از مساحتی با سطح مقطع A و چگالی ρ عبور می‌کند منجر به تولید توان می‌گردد. این توان از رابطه زیر بدست می‌آید [13]:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad (۱)$$

قانون Betz می‌گوید تنها ۵۹ درصد از این توان را می‌توان از طریق توربین بادی استخراج نمود. در یک توربین بادی واقعی، توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد وابسته است. به ازای سرعت‌های کوچک که در واقع از سرعت قطع پایین کوچکتر هستند توربین بادی متوقف بوده و توانی تولید نمی‌شود. به ازای سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی، توان توربین بادی متناسب با سرعت باد به توان ۳ می‌باشد تا اینکه در سرعت نامی توان تولیدی توربین بادی به مقدار ثابتی که توان نامی توربین بادی است برسد، سپس از سرعت نامی تا سرعت قطع بالا توان توربین بادی ثابت و برابر با توان نامی توربین بادی می‌باشد. به ازای سرعت‌های بالاتر از سرعت قطع بالا نیز توان توربین بادی صفر خواهد بود زیرا این سرعت‌ها برای توربین بادی خطرناک بوده و به آن آسیب می‌رساند بنابراین برای جلوگیری از خراب شدن توربین بادی در این سرعت‌ها توربین بادی را متوقف می‌کنند. منحنی توان توربین بادی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی توان توربین بادی

به منظور تولید برق در نیروگاه‌های بادی می‌توان از انواع مختلف ژنراتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. در خروجی این نیروگاه‌ها یک ترانسفورماتور قرار گرفته است تا توان تولیدی نیروگاه را به سطح ولتاژ شبکه قدرت برساند. جریان عبوری از ترانسفورماتور به توان تولیدی نیروگاه بستگی دارد. بنابراین با تغییر توان تولیدی نیروگاه بادی، جریان عبوری از ترانسفورماتور نیز تغییر می‌کند. با تغییر جریان عبوری از ترانسفورماتور نرخ خرابی آن نیز تغییر می‌کند.

۲-۲- نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی

به منظور تولید برق از انرژی امواج دو نوع نیروگاه ساخته شده است. در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی یک سد بین دریا و مخزن ذخیره آب ساخته می‌شود. در دیواره این سد تعدادی دریچه تعبیه می‌گردد تا امکان جابجایی آب بین دریا و مخزن ذخیره آب فراهم گردد. در هنگام بروز جزرومد که ارتفاع آب دریا پایین و بالا می‌رود آب از طریق دریچه‌ها بین مخزن و دریا جابجا می‌گردد. در این دریچه‌ها توربین‌هایی قرار داده می‌شود و بنابراین با عبور آب از این توربین‌ها برق تولید می‌گردد. در این نیروگاه‌ها، سدی بین دریا و مخزن ذخیره آب احداث می‌گردد. بر روی این سد می‌توان جاده ایجاد نمود تا هزینه ساخت سد به دلیل ایجاد جاده کمتر شود و احداث نیروگاه جزرومدی مخزنی توجیه اقتصادی داشته باشد. در دیواره سد نیز دریچه‌ها و توربین‌های درون دریچه‌ها نصب می‌شود [14]. به منظور بیان تغییرات ارتفاع جزرومد در هر منطقه از داده‌های ارتفاع جزرومد در این منطقه که در طی چندین سال جمع‌آوری شده است استفاده می‌شود. سپس یک سری فوریه به این داده‌ها برازش شده و از این سری برای نشان دادن تغییرات ارتفاع جزرومد استفاده می‌شود. این سری به صورت رابطه زیر می‌باشد. در این رابطه h_0 مولفه dc، h_k ارتفاع مربوط به هارمونیک kام، w_k فرکانس زاویه‌ای kام و θ نیز زاویه مربوط به این هارمونیک می‌باشد [15].

$$h(t) = h_0 + \sum_{k=1}^{n} h_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (۲)$$

توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه e_T بازده توربین، e_G بازده ژنراتور، ρ چگالی آب دریا، g شتاب گرانش زمین، h اختلاف ارتفاع بین دریا و مخزن و q نرخ انتقال آب از توربین است [16].

$$P = e_T e_G \rho g h q \quad (۳)$$

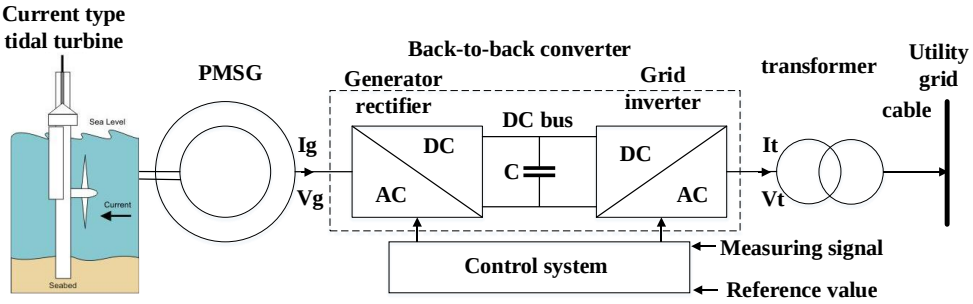
۲-۳- نیروگاه جزرومدی نوع جریانی

در این نوع نیروگاه توربین‌های جزرومدی جریانی در اعماق آب دریا نصب می‌شوند. عبور جریان‌های جزرومدی که دارای انرژی جنبشی می‌باشند از این توربین‌ها سبب تولید برق می‌گردد [17]. فرایند تولید توان در نیروگاه جزرومدی جریانی مشابه تولید توان در نیروگاه بادی است. با این تفاوت که در نیروگاه بادی توده هوا انرژی جنبشی دارد و سبب چرخاندن توربین‌ها می‌گردد اما در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی سیال آب به خاطر وجود جریان‌های جزرومدی دارای انرژی جنبشی بوده و سبب چرخاندن توربین جزرومدی نوع جریانی می‌گردد. بنابراین به مانند توربین‌های بادی توان تولیدی توربین جزرومدی نوع جریانی در نتیجه عبور جریان آب با سرعت v از سطح مقطع A از رابطه زیر به دست می‌آید. در اینجا نیز ρ چگالی آب دریا است و C_P عدد بتز است [18].

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A v^3 \quad (۴)$$

با داشتن داده‌های سرعت باد به صورت ساعت به ساعت و همچنین منحنی توان توربین مربوط به این توربین، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریانی در طول ساعت به ساعت برای یک سال به دست می‌آید. توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریانی در طول سال تغییرات زیادی دارد. بنابراین جریان عبوری از ترانسفورماتور متصل به این نیروگاه‌ها نیز متغیر خواهد بود. در شکل (۲) ساختار یک نیروگاه جزرومدی نوع جریانی نشان داده شده است [19]. همانگونه که در این شکل مشخص است در این نیروگاه، توربین جزرومدی نوع جریانی یک ژنراتور را می‌چرخاند و برق تولید می‌شود و به منظور کنترل ولتاژ و

فرکانس برق تولیدی از یک مبدل الکترونیک قدرت در خروجی ژنراتور استفاده شده است. سپس توسط یک ترانسفورماتور سطح ولتاژ به مقدار مورد نظر شبکه تغییر داده شده و توسط کابل نیز توان الکتریکی به شبکه قدرت منتقل می‌شود.



شکل (۲): ساختار یک نیروگاه جزرومدی جریانی

۳- نرخ خرابی ترانسفورماتور در انواع مختلف نیروگاه‌ها

در یک ترانسفورماتور تجهیزاتی که سبب خراب شدن آن می‌گردند عبارتند از عایق سیم‌پیچ، عایق اصلی که در ترانسفورماتورهای روغنی از جنس روغن و در ترانسفورماتورهای خشک از جنس رزین ریختگی است، هسته، مخزن، تپ چنجر و بوشینگ می‌باشد. با خراب شدن هر کدام از این تجهیزات، ادامه کارکرد ترانسفورماتور با مشکل روبه‌رو شده و لذا نرخ خرابی ترانسفورماتور مجموع نرخ خرابی این تجهیزات خواهد بود. با توجه به اینکه دمای ترانسفورماتور در تعیین نرخ خرابی ترانسفورماتور اهمیت دارد بایستی رابطه بین جریان الکتریکی عبوری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و دمای ترانسفورماتور بدست آورده شود؛ چرا که در این مقاله ما به دنبال بررسی اثر تغییر جریان الکتریکی عبوری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور بر قابلیت اطمینان ترانسفورماتور هستیم.

بر اساس استاندارد IEC 60076-7 دمای کار ترانسفورماتور نوع روغنی که کاربرد زیادی در سیستم قدرت دارد را می‌توان بر حسب جریان عبوری از ترانسفورماتور بدست آورد [20]. رابطه بین دمای ترانسفورماتور و جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های آن در رابطه (۵) آورده شده است. در این رابطه T دمای ترانسفورماتور، TA دمای محیط، DT میزان افزایش دمای ترانسفورماتور در تلفات نامی می‌باشد که این سه پارامتر بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشند. پارامتر A نسبت تلفات بارداری ترانسفورماتور به تلفات بی باری ترانسفورماتور می‌باشد که در جریان نامی این نسبت حاصل می‌شود. پارامتر O شاخص مربوط به روغن ترانسفورماتور است، فاکتور C مربوط به نقطه داغ ترانسفورماتور است، G متوسط دمای سیم‌پیچ ترانسفورماتور به دمای روغن در جریان نامی بوده و W شاخص مربوط به سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. جریان I جریان عبوری از سیم‌پیچ ترانسفورماتور و IN نیز جریان نامی ترانسفورماتور است.

$$T = TA + DT\left(\frac{1+A\left(\frac{I}{IN}\right)^2}{1+A}\right)^O + CG\left(\frac{I}{IN}\right)^W \quad (۵)$$

با داشتن دمای کار ترانسفورماتور به ازای جریان الکتریکی مختلف می‌توان از قانون آرسنیوس استفاده کرد و نرخ خرابی ترانسفورماتور را تعیین نمود. در رابطه زیر بر اساس قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور به دست آمده است [21]:

$$F = F_0 e^{-\frac{E_A}{k}\left(\frac{1}{T+273}-\frac{1}{TA_0+273}\right)} \quad (۶)$$

در رابطه فوق F نرخ خرابی ترانسفورماتور و F_0 نرخ خرابی ترانسفورماتور در دمای محیط TA_0 که معمولا ۲۵ درجه در نظر گرفته می‌شود می‌باشد، پارامتر E_A انرژی فعالسازی و k ضریب بولتزمان می‌باشد. در ادامه این فصل نرخ خرابی ترانسفورماتور استفاده شده در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی مخزنی و جزرومدی جریانی تعیین می‌گردد.

در نیروگاه بادی توان تولیدی نیروگاه با سرعت باد به صورت منحنی توان نیروگاه بادی رابطه دارد. از طرف دیگر ولتاژ القایی در ژنراتور نیز به سرعت وزش باد بستگی دارد. در سرعت‌های باد بین ۰ تا سرعت قطع پایین توان تولیدی نیروگاه بادی صفر

است که در نتیجه جریان تولیدی نیروگاه نیز صفر است و جریانی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور نمی‌گذرد. لذا نرخ خرابی ترانسفورماتور در این بازه جریان برابر با نرخ خرابی پایه ترانسفورماتور است، زیرا اگر از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور جریان هم نگذرد باز به خاطر اینکه ولتاژ به ترانسفورماتور اعمال شده و ممکن است تجهیزی خراب شود و منجر به خرابی ترانسفورماتور گردد. در سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی توان تولیدی نیروگاه بادی به مکعب سرعت باد بستگی دارد و از طرف دیگر ولتاژ تولیدی نیروگاه نیز به سرعت باد وابسته است. بنابراین رابطه جریان که از تقسیم توان بر ولتاژ حاصل می‌شود به صورت رابطه درجه دوم با سرعت باد خواهد بود. به ازای سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا توان تولیدی نیروگاه بادی ثابت است، چرا که سعی می‌شود توربین و روتور در سرعت نامی به صورت ثابت بچرخد. بنابراین هم توان تولیدی نیروگاه و هم ولتاژ تولیدی نیروگاه به دلیل ثابت بودن سرعت چرخش روتور ثابت است. در این شرایط یعنی از سرعت نامی تا سرعت قطع بالا، چون جریان ثابت است نرخ خرابی ترانسفورماتور نیز ثابت بوده و برابر با نرخ خرابی حالت سرعت نامی می‌باشد. برای سرعت‌های بالاتر از سرعت قطع بالا نیز چون توان تولیدی نیروگاه صفر می‌شود، نرخ خرابی ترانسفورماتور با نرخ خرابی حالت پایه برابر خواهد بود[22].

در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی توان تولیدی نیروگاه به اختلاف ارتفاع آب مخزن ذخیره و آب دریا بستگی دارد. هر چه این اختلاف ارتفاع که به آن هد آب گفته می‌شود و از توربین عبور می‌کند بیشتر باشد، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی نیز بیشتر است. البته در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی برای توربین‌های به کار رفته در نیروگاه یک حداقل هد آب وجود دارد که توربین زمانی برق تولید می‌کند که هد آب عبوری از آن از این حداقل هد آب بیشتر باشد. برای تعیین جریان عبوری از ترانسفورماتور بایستی به ازای اختلاف ارتفاع‌های متفاوت آب، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی محاسبه و سپس جریان تولیدی آن به دست می‌آید. سپس بر اساس روابط به دست امده برای ترانسفورماتور دمای ترانسفورماتور تعیین می‌گردد و به کمک قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور محاسبه می‌شود. در هنگام تعیین توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بایستی محدودیت‌های مربوط به این نیروگاه‌ها در نظر گرفته شود. یکی از محدودیت‌های این نیروگاه‌ها مربوط به توربین است که گفته شد. به این معنا که توربین‌های به کار رفته در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی زمانی برق تولید می‌کنند که هد آب عبوری از آن‌ها از یک مینیمم بیشتر باشد. محدودیت بعدی مربوط به مخزن ذخیره آب در این نیروگاه‌ها است. در مخزن ذخیره آب یک ارتفاع مینیمم و یک ارتفاع ماکزیمم وجود دارد. به این معناد که ارتفاع آب درون مخزن نباید از یک مقدار مینیمم کمتر باشد و همچنین ارتفاع آب درون مخزن نمی‌تواند از یک مقدار ماکزیمم بیشتر شود. بنابراین در تعیین توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بایستی به این محدودیت‌ها توجه نمود.

در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی نیز بایستی به ازای سرعت جریان‌های جزرومدی مختلف توان تولیدی نیروگاه به دست آید. توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریانی به منحنی توان توربین وابسته است. بر اساس این منحنی، در سرعت‌های جریان‌های جزرومدی که از مقدار سرعت قطع پایین کمتر است توان تولیدی صفر می‌باشد. به ازای سرعت‌های جریان‌های جزرومدی که بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی است توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریانی به مکعب سرعت جریان‌های جزرومدی وابسته است. به ازای سرعت جریان‌های جزرومدی که از سرعت نامی بزرگتر است نیز توان تولیدی نیروگاه مقدار ثابتی دارد و برابر با توان نامی نیروگاه است؛ زیرا در این سرعت‌ها، سرعت چرخش توربین برابر با سرعت نامی قرار داده شده است. نکته‌ای که بایستی به آن دقت نمود این است که در نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریانی با توجه به اینکه سرعت جریان‌های جزرومدی به مانند سرعت باد زیاد نیست، سرعت چرخش توربین هیچگاه در توربین‌های جزرومدی نوع جریانی به سرعتی که برای توربین خطرناک باشد نمی‌رسد و بنابراین در این نیروگاه‌ها در منحنی توان توربین سرعت قطع بالا که بخواهد تولید توان را محدود کند وجود ندراد. از طرف دیگر باید گفته شود که درست است در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی سرعت جریان‌ها پایین است اما چگالی آب دریا خیلی نسبت به چگالی هوا بیشتر است و این چگالی تا حد زیادی کم بودن سرعت را جبران می‌نماید. به منظور تعیین نرخ خرابی ترانسفورماتورهای استفاده شده در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی نیز در سرعت‌های مختلف جریان‌های جزرومدی، توان تولیدی نیروگاه بدست آورده می‌شود. سپس جریان تولیدی نیروگاه

محاسبه می‌گردد و در ادامه دمای کار ترانسفورماتور و در نهایت به کمک قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور محاسبه می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

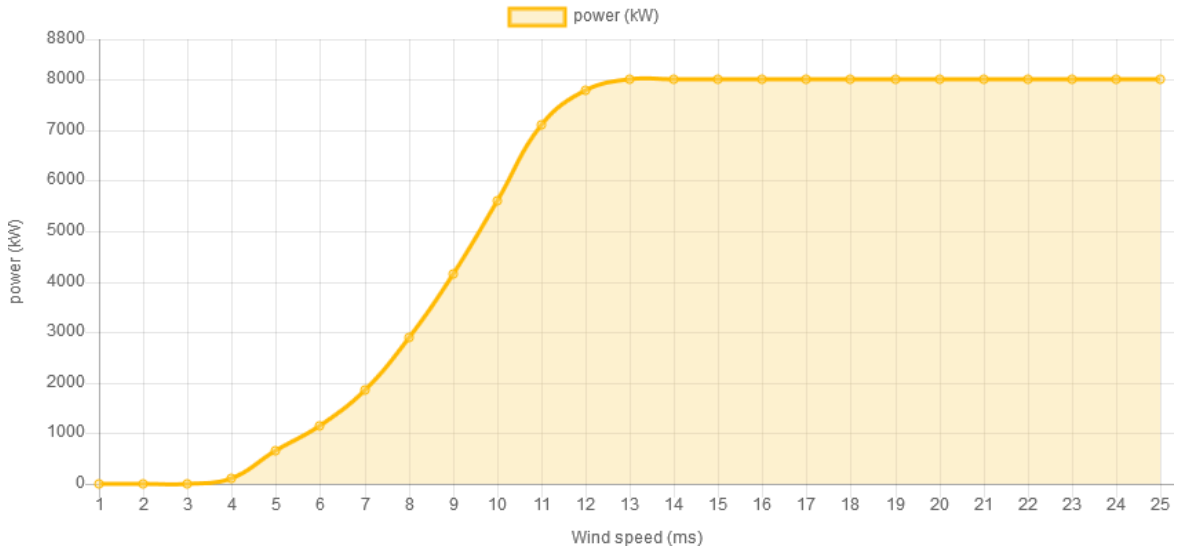
به منظور بررسی تاثیر تغییرات سرعت باد، ارتفاع جزرومد و سرعت جریان‌های جزرومدی بر نرخ خرابی ترانسفورماتورهای قدرت به کار رفته در نیروگاه‌های بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی در این قسمت از تحقیق شبیه‌سازی سه نیروگاه بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی انجام می‌شود. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب انجام شده و برای نشان دادن روابط بین نرخ خرابی و متغیرها از کدنویسی به صورت mfile استفاده شده است.

ابتدا مشخصات ترانسفورماتور قدرت به کار رفته در این نیروگاه‌ها بیان می‌گردد. در جدول (۱) پارامترهای مربوط به مدل حرارتی ترانسفورماتور قدرت آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتور قدرت مورد استفاده

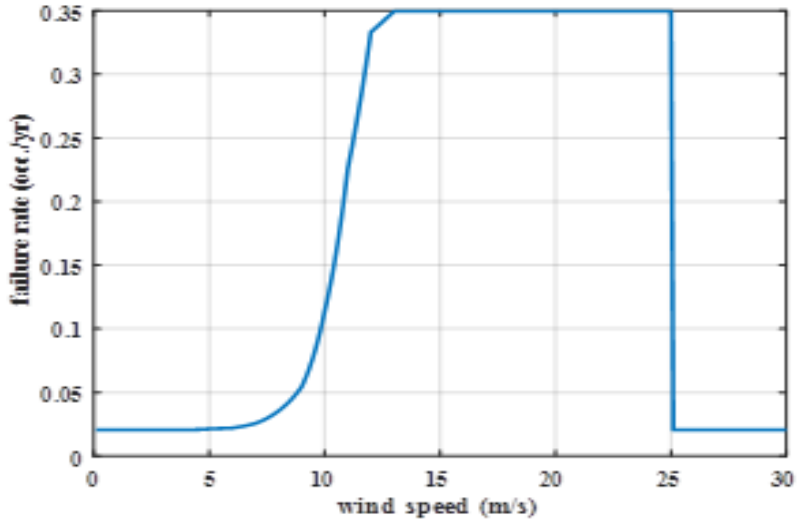
پارامتر	مقدار
دمای محیط	۲۵ درجه سانتیگراد
تغییر دمای ترانسفورماتور در تلفات مربوط به جریان نامی	۵۲ درجه سانتیگراد
نسبت تلفات بارداری ترانسفورماتور به تلفات بی باری ترانسفورماتور در جریان	۶
شاخص مربوط به روغن	۰/۸
شاخص مربوط به سیم‌پیچ	۱/۳
فاکتور مربوط به نقطه داغ ترانسفورماتور	۱/۱
متوسط دمای سیم‌پیچ ترانسفورماتور به دمای روغن در جریان نامی	۱۴/۵
انرژی فعالسازی	۰/۲

در این مقاله از توربین بادی Vestas-164 که یک توربین بادی ۸ مگاواتی است استفاده شده است. منحنی توان این توربین در شکل (۳) آورده شده است.



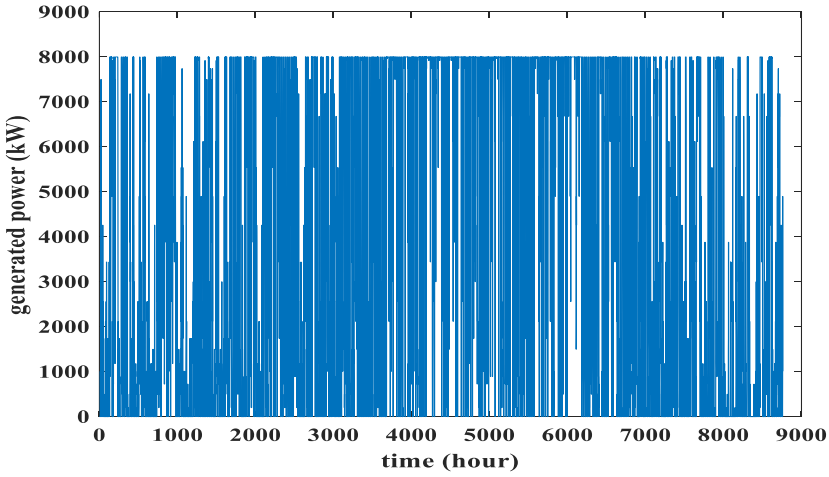
شکل (۳): منحنی توان توربین بادی مورد مطالعه

با استفاده از روابط بیان شده و با داشتن پارامترهای قابلیت اطمینان ترانسفورماتور، نرخ خرابی ترانسفورماتور متصل به این توربین به ازای سرعت‌های باد مختلف محاسبه شده و در شکل (۴) رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است توربین بادی مورد استفاده سرعت قطع پایین ۴ متر بر ثانیه، سرعت نامی ۱۲ متر بر ثانیه و سرعت قطع بالای ۲۵ متر بر ثانیه را دارد. همانگونه که در شکل (۴) مشخص است در صورتی که سرعت باد کمتر از ۴ متر بر ثانیه باشد، نرخ خرابی ترانسفورماتور همان نرخ خرابی پایه می‌باشد؛ زیرا در این شرایط توان تولیدی توربین بادی صفر است. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی، یعنی سرعت‌های باد بین ۴ تا ۱۲ متر بر ثانیه، نرخ خرابی توربین بادی افزایش می‌یابد؛ زیرا در این نواحی توان تولیدی توربین بادی متناسب با توان ۳ سرعت باد افزایش می‌یابد. به ازای سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا نیز چون توان تولیدی توربین بادی ثابت می‌باشد، نرخ خرابی ترانسفورماتور نیز ثابت و برابر با نرخ خرابی حالت سرعت یا توان نامی می‌باشد و به ازای سرعت باد بالاتر از سرعت قطع بالا، نرخ خرابی ترانسفورماتور برابر با نرخ خرابی پایه می‌باشد زیرا در این شرایط نیز توان تولیدی توربین بادی صفر خواهد بود.



شکل (۴): نرخ خرابی ترانسفورماتور استفاده شده در توربین بادی

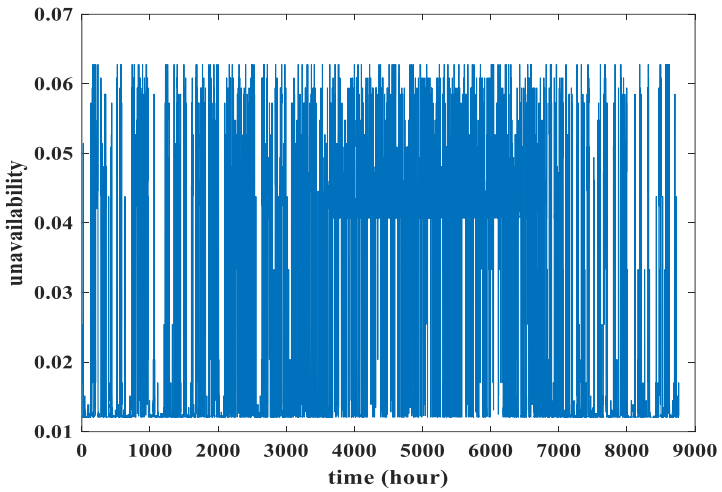
با توجه به داده‌های سرعت باد در منطقه منجیل و به کمک منحنی توان توربین بادی، توان تولیدی نیروگاه بادی ۸ مگاواتی در هر ساعت از سال محاسبه شده و در شکل (۵) نشان داده شده است.



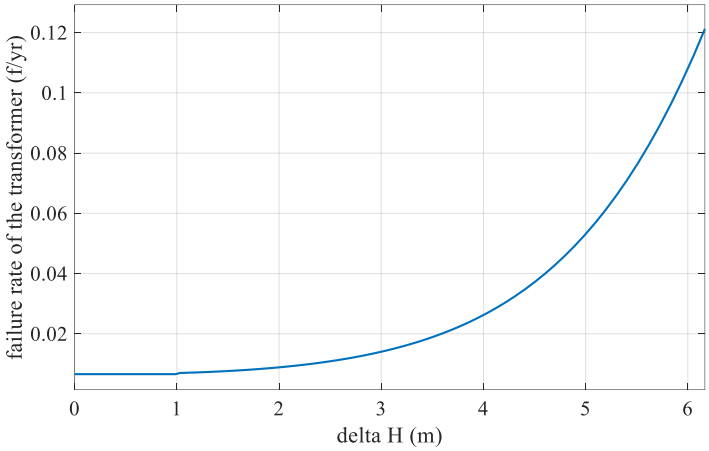
شکل (۵): توان تولیدی توربین بادی در سال

با داشتن نرخ خرابی ترانسفورماتور در هر ساعت از سال و با در نظر گرفتن نرخ تعمیر ۱۷ بار در سال برای ترانسفورماتور، احتمال خراب بودن ترانسفورماتور که به آن عدم دسترس‌پذیری گفته می‌شود در هر ساعت از سال محاسبه شده و در شکل (۶) نشان داده شده است. به منظور محاسبه دسترس‌ناپذیری کافی است نرخ خرابی بر مجموع نرخ خرابی و نرخ تعمیر تقسیم شود. همانگونه که مشخص است دسترس‌ناپذیری ترانسفورماتور به دلیل تغییر سرعت باد در طول سال متغیر می‌باشد.

در این قسمت از تحقیق شبیه‌سازی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی صورت می‌گیرد. به منظور به دست آوردن توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بایستی اختلاف ارتفاع جزرومد به دست آورده شود و با استفاده از محدودیت‌های نیروگاه، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی محاسبه گردد. در نیروگاه جزرومدی مورد مطالعه فرض می‌شود توربین زمانی می‌تواند برق تولید کند که هد آب از ۱ متر بیشتر شود و به ازای هدهای آب کمتر از ۱ متر توان تولیدی نیروگاه صفر خواهد بود. با توجه به رابطه توان، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی به اختلاف ارتفاع آب درون مخزن و آب درون دریا بستگی داشته و بنابراین با به دست آوردن توان، جریان تولیدی نیروگاه که از ترانسفورماتور می‌گذرد نیز متناسب با اختلاف ارتفاع آب درون مخزن و ارتفاع جزرومد می‌باشد. با بدست آوردن جریان ترانسفورماتور بر اساس استاندارد IEC دمای ترانسفورماتور به دست آورده شده و بر اساس قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور به دست آورده می‌شود. در شکل (۶) نمودار نرخ خرابی ترانسفورماتور به کار رفته در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بر حسب اختلاف بین ارتفاع آب درون مخزن ذخیره و ارتفاع جزرومد نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است به ازای هدهای آب کمتر از ۱ متر چون توربین توانی تولید نمی‌کند و جریانی از ترانسفورماتور نمی‌گذرد نخ خرابی ترانسفورماتور با مقدار پایه برابر است اما به ازای هدهای آب بیشتر از ۱ متر نرخ خرابی ترانسفورماتور به دلیل جاری شدن جریان در ترانسفورماتور روند افزایشی دارد.

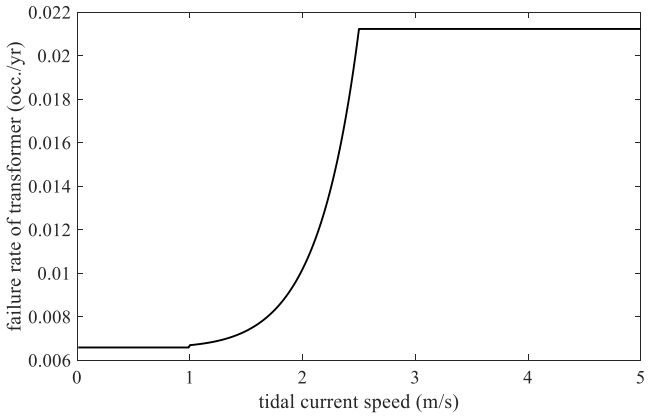


شکل (۵): دسترس‌ناپذیری ترانسفورماتور



شکل (۶): نمودار نرخ خرابی ترانسفورماتور در نیروگاه جزرومدی مخزنی

در این قسمت از تحقیق یک توربین جزرومدی نوع جریانی ساخت شرکت SEAGEN که قابلیت تولید ۲ مگاوات توان الکتریکی را دارد در نیروگاه جزرومدی جریانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت قطع پایین این توربین ۱ متر بر ثانیه و سرعت نامی آن ۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. توان تولیدی این توربین در سرعت‌های مختلف مشخص بوده و بر اساس آن جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و در نهایت به کمک قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور در سرعت‌های مختلف به دست می‌آید. در شکل (۷) نمودار نرخ خرابی ترانسفورماتور بر حسب سرعت‌های مختلف جریان‌های جزرومدی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است به ازای سرعت‌های کمتر از ۱ متر بر ثانیه چون توان تولیدی نیروگاه جزرومدی جریانی صفر است نرخ خرابی ترانسفورماتور با نرخ خرابی پایه برابر است. به ازای سرعت‌های بین ۱ تا ۲/۵ متر بر ثانیه نیز که توان تولیدی نیروگاه متناسب با توان ۳ سرعت است، نرخ خرابی ترانسفورماتور روند افزایشی دارد و به ازای سرعت‌های بیشتر از سرعت نامی یعنی سرعت‌های بیشتر از ۲/۵ متر بر ثانیه نرخ خرابی ترانسفورماتور ثابت می‌ماند. زیرا در این شرایط توان تولیدی توربین جزرومدی نوع جریانی ثابت می‌باشد.



شکل (۷): نرخ خرابی ترانسفورماتور استفاده شده در نیروگاه جزرومدی جریانی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت اطمینان و نرخ خرابی ترانسفورماتورهای قدرت با در نظر گرفتن اثر تغییرات جریان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه جریان عبوری از ترانسفورماتور قدرت در حال تغییر است نرخ خرابی این تجهیز نیز متغیر بوده و تغییرات نرخ خرابی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اینکه نیروگاه‌هایی که در سال‌های اخیر در سطح دنیا احداث شده‌اند مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر بوده‌اند و توان تولیدی این نیروگاه‌ها در طول زمان تغییر می‌کند ترانسفورماتورهای نصب

شده در نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر باد و جزرومد مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین نرخ خرابی ترانسفورماتور بایستی مشخص نمود که دمای کار ترانسفورماتور با ازای جریان‌های الکتریکی مختلف چقدر است. بر همین اساس بر اساس یکی از استانداردهای IEC دمای کار ترانسفورماتور بر حسب جریان عبوری در سیم‌پیچ به دست آورده شد. در این رابطه نسبت جریان عبوری ترانسفورماتور به جریان نامی آن بایستی مشخص باشد تا بتوان دمای ترانسفورماتور را تعیین نمود. البته این رابطه برای ترانسفورماتورهای نوع روغنی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در صورتی که از ترانسفورماتورهای خشک استفاده شود بایستی از رابطه مربوطه استفاده گردد. با توجه به اینکه غالب ترانسفورماتورهایی که در شبکه قدرت وجود دارند ترانسفورماتور نوع روغنی است و ترانسفورماتور نوع خشک بیشتر در سطوح ولتاژ و توان پایین‌تر استفاده می‌شود در این مقاله ترانسفورماتورهای نوع روغنی مورد مطالعه قرار گرفته است. با داشتن دمای ترانسفورماتور به ازای جریان‌های الکتریکی مختلف که می‌تواند ناشی از تغییر بار اعمالی به ترانسفورماتور و یا تغییر توان تولیدی اعمالی به ترانسفورماتور باشد، به کمک قانون آرسنیوس نرخ خرابی ترانسفورماتور به ازای جریان‌های مختلف به دست آورده شد. قانون آرسنیوس یک رابطه نمایی است که در دماهای مختلف نرخ خرابی را به دست می‌دهد. بسته به اینکه ترانسفورماتور در کدام یک از نیروگاه‌های بادی، جزرومدی مخزنی و جزرومدی نوع جریانی استفاده می‌شود روابط مربوطه به دست آورده شد.

در نیروگاه بادی، توان تولیدی توربین بادی بر اساس منحنی توان توربین به سرعت باد وابسته است و بنابراین با داشتن منحنی توربین می‌توان توان تولیدی نیروگاه بادی را به ازای سرعت‌های باد مختلف به دست آورد. در این نیروگاه‌ها چندین بازه برای سرعت باد در نظر گرفته می‌شود. به ازای سرعت باد کمتر از سرعت قطع پایین توان خروجی صفر است و به ازای سرعت باد بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی توربین، توان تولیدی توربین به صورت درجه سه با سرعت باد رابطه دارد. به ازای سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا، سرعت توربین ثابت نگه داشته شده و لذا توان توربین بادی ثابت خواهد بود و برابر با توان نامی توربین می‌باشد. همچنین به ازای سرعت بالاتر از سرعت قطع بالا، توان توربین بادی صفر می‌باشد. زیرا به ازای این سرعت‌ها، توربین متوقف می‌شود تا به آن آسیب نرسد. در این تحقیق نرخ خرابی ترانسفورماتور به کار رفته در توربین بادی، شکلی شبیه منحنی توان توربین داشت. به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین و سرعت باد بالاتر از سرعت قطع بالا نرخ خرابی ترانسفورماتور با نرخ خرابی پایه ترانسفورماتور برابر بود زیرا در این حالت جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها صفر بود. به ازای سرعت باد بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی نرخ خرابی ترانسفورماتور به صورت افزایشی بود و به ازای سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا چون توان تولیدی نیروگاه بادی ثابت بود نرخ خرابی ترانسفورماتور ثابت و برابر با نرخ خرابی ترانسفورماتور در سرعت نامی بود.

سپس نرخ خرابی ترانسفورماتور استفاده شده در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد بررسی قرار گرفت. در این نیروگاه‌ها توان تولیدی به اختلاف ارتفاع بین آب درون مخزن و آب دریا بستگی دارد. البته توربین‌های به کار رفته در این نیروگاه‌ها معمولا در هدهای پایین برق تولید نمی‌کنند و برای هر توربین یک مینیمم هد آب وجود دارد که توربین به ازای هدهای کمتر از آن توان الکتریکی‌اش صفر و به ازای هدهای بزرگتر از آن شروع به تولید برق می‌کند. مقدار توان تولیدی توربین جزرومدی مخزنی به ازای هدهای بعد از مینیمم هد توربین، متناسب با هد آب می‌باشد. نرخ خرابی ترانسفورماتور به کار رفته در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی نیز بر حسب اختلاف ارتفاع آب درون مخزن و آب دریا به دست آورده شده است. به ازای هدهای آب از ۰ تا مینیمم هد توربین، نرخ خرابی ترانسفورماتور ثابت و برابر با نرخ خرابی پایه می‌باشد. سپس به ازای هدهای آب بزرگتر از مقدار مینیمم، نرخ خرابی ترانسفورماتور روند افزایشی دارد.

در پایان نیز نرخ خرابی ترانسفورماتور به کارر فته در نیروگاه جزرومدی نوع جریانی به دست اورده شد. در این قسمت نیز شکل نرخ خرابی ترانسفورماتور به منحنی توان توربین جزرومدی نوع جریانی شبیه بود. در منحنی توان توربین جزرومدی نوع جریانی نیز سه ناحیه وجود دارد. یکی سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین است که در اینجا توان تولیدی تروبین صفر است. دوم سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی است که در این ناحیه توان تولیدی توربین با درجه سوم سرعت جریان‌های جزرومدی رابطه دارد. ناحیه سوم به ازای سرعت‌های بزرگتر از سرعت نامی حاصل می‌شود که در این سرعت‌ها توان تولیدی توربین ثابت و برابر با توان نامی توربین است. نرخ خرابی ترانسفورماتور به کار رفته در توربین جزرومدی نوع

مخزنی نیز مشابه منحنی توان توربین این نیروگاه‌ها می‌باشد. به ازای سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین، نرخ خرابی ترانسفورماتور به دلیل صفر بودن توان تولیدی نیروگاه برابر با مقدار پایه است. به ازای سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی، نرخ خرابی ترانسفورماتور روند افزایشی داشته و به ازای سرعت‌های بزرگتر از سرعت نامی به دلیل ثابت بودن توان، نرخ خرابی ترانسفورماتور نیز ثابت می‌باشد. در این تحقیق شبیه‌سازی سه نیروگاه بادی، جزرومدی نوع مخزنی و جزرومدی نوع جریانی صورت گرفت و نتایج حاصل از نرخ خرابی بر حسب سرعت باد، ارتفاع جزرومد و سرعت جریان‌های جزرومدی به صورت نمودار نشان داده شد. با توجه به مشخص شدن نرخ خرابی ترانسفورماتور در سرعت باد مختلف، ارتفاع جزرومد مختلف و سرعت جریان‌های جزرومدی مختلف و با داشتن داده‌های ساعت به ساعت سرعت باد، ارتفاع جزرومد و سرعت جریان‌های جزرومدی می‌توان نرخ خرابی ترانسفورماتور را در طول سال به صورت ساعت به ساعت محاسبه نمود و در مطالعات قابلیت اطمینان به کار برد. نوآوری این مقاله این است که قابلیت اطمینان و عملکرد ترانسفورماتور برای انواع مختلف نیروگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و منحصر به یک نیروگاه خاص نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسنده از آقای دکتر امیر قائدی، 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] Sefidgaran, M., MOHAMMAD MIRZAEI, and AA EBRAHIMZADEH. "Reliability model of power transformer with ONAN cooling." pp. 93-102, 2010.

[2] Freitag, Suelen Cristiane, and Mauricio Sperandio. "Determining the reliability of power transformers considering a five states Markov Model." *IEEE Latin America Transactions* vol.19, pp.335-341., Sep. 2020.

[3] Abdelfatah, M., M. El-Shimy, and H. M. Ismail. "Reliability analysis of 220 kV power transformers in Egypt." *Ain Shams Engineering Journal* 2.3-4, pp. 183-194,Dec 2011.

[4] Jagers, Janine, and Stefan Tenbohlen. "Evaluation of transformer reliability data based on national and utility statistics." *16th International Symposium on High Voltage Engineering*. Jun. 2009.

[5] Chafai, Mahfoud, Larbi Refoufi, and Hamid Bentarzi. "Large power transformer reliability modeling." *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 7.Suppl 1, pp. 9-17, May 2016.

[6] Attiyah, Badr A., Abdullah A. Alnujaimi, and Mohammad A. Alghamdi. "Reliability Enhancement of High Voltage Power Transformer Using Online Oil Dehydration." *2019 Modern Electric Power Systems conference (MEPS)*. IEEE, Sep. 2019.

[7] Wen, Minmin, et al. "Reliability assessment of insulation system for dry type transformers." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.* 20 No.6 , pp. 1998-2008, Dec 2016.

[8] *Awadallah, Selma KE, Jovica V. Milanović, and Paul N. Jarman. "The influence of modeling transformer age related failures on system reliability." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No.2 , pp. 970-979, Mar. 2015.*

[9] He, Jian, et al. "A hybrid conditions-dependent outage model of a transformer in reliability evaluation." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No.4, pp. 2025-2033, Dec. 2019.

[10] Liu, Mingjun, et al. "Reliability evaluation of tidal and wind power generation system with battery energy storage." Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 4, No. 4, pp. 636-647, Sep. 2016.

[11] Liu, Mingjun, et al. "Reliability evaluation of a tidal power generation system considering tidal current speeds." *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 4, pp.* 3179-3188, July 2016.

[12] Zhong, Wen, et al. "Reliability evaluation and improvement of islanded microgrid considering operation failures of power electronic equipment." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 8, No. 1, pp.* 111-123. Jan. 2020.

[13] Li, H., and Zhe Chen. "Overview of different wind generator systems and their comparisons." *IET Renewable Power Generation*, Vol. 2, No. 2, pp. 123-138, Jun 2008.

[14] Neto, Pedro Bezerra Leite, Osvaldo R. Saavedra, and Luiz Antonio de Souza Ribeiro. "Analysis of a tidal power plant in the estuary of Bacanga in Brazil taking into account the current conditions and constraints." *IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 8, No. 3, pp.* 1187-1194, July 2017.

[15] Neto, Pedro B. Leite, Osvaldo R. Saavedra, and Luiz A. Souza Ribeiro. "Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints." *Renewable Energy* journal, Vol. 81, pp. 11-20, Sep. 2015.
[16] Ferreira, Rafael M., and Segen F. Estefen. "Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions." *Renewable Energy journal. Vol.* 34, No.4, pp. 1151-1157, Apr. 2009.
[17] King, J., and T. Tryfonas. "Tidal stream power technology-state of the art." *OceansEurope journal, pp. 113-116, May* 2009.
[18] Blunden, L. S., and A. S. Bahaj. "Tidal energy resource assessment for tidal stream generators." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol 221, No.2, pp. 137-146, March 2007.
[19] O'carroll, J. P. J., et al. "Tidal Energy: The benthic effects of an operational tidal stream turbine." *Marine Environmental Research* , Vol. 129, pp. 277-290, Aug. 2017.
[20] Power Transformer—Part7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers. IEC Std. 60076, 2017
[21] Husnayain, F., M. Latif, and I. Garniwa. "Transformer oil lifetime prediction using the Arrhenius law based on physical and electrical characteristics." *2015 International Conference on Quality in Research (QiR)*. IEEE, Aug. 2015.
[22] Wang, C.; Wu, J.; Wang, J.; Zhao, W. “Reliability Analysis and Overload Capability Assessment of Oil-Immersed Power Transformers.” *Energies Journal*,Vol. 9, No. 43, Jan. 2016.