

Reliability evaluation of power plants and transmission lines considering wave power plants

Milad Barzin, *M.Sc*

Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
miladbarzin1371@gmail.com

Received: 13 June 2023

Revised: 16 September 2023

Accepted: 30 September 2023

Abstract:

In recent years, countries around the world have turned to renewable energy sources such as wind, sun, and oceans to provide sustainable energy. The driving force behind the growth in the use of these sources in electricity generation is the problems related to fossil fuels such as rising prices, greenhouse gas emissions, and environmental problems, as well as concerns about the depletion of these fuels. Ocean energy comes in various forms such as waves, tides, and ocean thermal energy, which, given the vastness of the oceans, can play a significant role in the future energy supply of the world. One of the problems related to renewable energy sources is the uncertainty of these sources, which has caused these energy sources to vary with time and also their changes to be random, so the production capacity of these sources may be low and insignificant when the grid load is increasing. Accordingly, power plants based on renewable energy sources are operated either separately from the power grid, but alongside energy storage devices, or in a state of connection to the power grid. On the other hand, with the increase in the level of welfare in today's societies, the reliability of the power grid has also become important and consumers expect electricity to be provided to them without interruption. In this paper, the reliability of a composite power system consisting of a generation and transmission system is evaluated in the conditions where wave power plants are present in the network and the production rate of these power plants is significant. These studies can be used to determine reliability indices and for decision-making in planning the development of production and also the development of the transmission system. In order to examine the proposed method, the results obtained from applying the method to standard test composite systems to which wave power plants have been added are presented.

Keywords: Reliability, wave power plant, composite power system, power plant, transmission lines.

Corresponding Author: Milad Barzin

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

ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها و خطوط انتقال با حضور نیروگاه‌های امواج

میلاد برزین، کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی برق - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
miladbarzin1371@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

چکیده: در سال‌های اخیر کشورهای مختلف جهان به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند باد، خورشید و اقیانوس جهت تأمین انرژی پایدار خود روی آورده‌اند. عامل محرک رشد استفاده از این منابع در تولید برق مشکلات مربوط به سوخت‌های فسیلی نظیر افزایش قیمت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد مشکلات زیست محیطی و نگرانی‌های موجود در مورد پایان یافتن این سوخت‌ها می‌باشد. انرژی اقیانوس به شکل‌های مختلفی نظیر امواج، جزرومد و انرژی حرارتی اقیانوس وجود دارد که با توجه به وسعت اقیانوس‌ها می‌تواند در تأمین انرژی آینده جهان نقش زیادی داشته باشد. یکی از مشکلات مربوط به منابع انرژی تجدیدپذیر عدم قطعیت این منابع می‌باشد که سبب شده است این منابع انرژی متغیر با زمان باشند و همچنین تغییرات آن‌ها به صورت تصادفی باشد و لذا ممکن است در شرایطی که بار شبکه در حال افزایش باشد توان تولیدی این منابع کم و ناچیز باشد. بر همین اساس نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر یا به صورت‌های جدا از شبکه قدرت اما در کنار ذخیره‌کننده‌های انرژی یا در حالت اتصال به شبکه قدرت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از طرف دیگر با بالا رفتن سطح رفاه در جوامع امروزی قابلیت اطمینان شبکه قدرت نیز اهمیت پیدا کرده و مصرف‌کنندگان انتظار دارند برق بدون قطعی به آن‌ها ارائه شود. در این مقاله قابلیت اطمینان سیستم قدرت مرکب که از سیستم تولید و انتقال تشکیل شده است در شرایطی که نیروگاه‌های امواج در شبکه حضور دارند و میزان تولیدات این نیروگاه‌ها قابل توجه است مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مطالعات می‌تواند برای تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان و به منظور تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی توسعه تولید و همچنین توسعه سیستم انتقال مورد استفاده قرار بگیرد. به منظور بررسی روش پیشنهادی نتایج حاصل از اعمال روش به سیستم‌های مرکب تست استاندارد که نیروگاه‌های امواج به آن‌ها اضافه شده است آورده شده است.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، نیروگاه امواج، سیستم مرکب، نیروگاه، خطوط انتقال.

نام نویسنده‌ی مسئول: میلاد برزین

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

۱- مقدمه

از اواخر دهه ۱۹۷۰ که قیمت نفت افزایش ناگهانی پیدا کرد کشورهای مختلف جهان به فکر تأمین انرژی خود از منابع انرژی پایدار و جایگزین نمودن سوخت‌های فسیلی افتادند. بر همین اساس تلاش‌هایی در جهت توسعه نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های بادی و اقیانوس صورت گرفت. اما در ادامه با ثبات نسبی که در قیمت نفت ایجاد شد روند رشد تکنولوژی‌های مربوط به این نیروگاه‌ها کند گردید تا اینکه در سال‌های اخیر به دلیل مشکلات زیست محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی به مانند تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن که موجب تخریب لایه ازن و گرم شدن کره زمین می‌گردند دوباره نگاه‌ها به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید برق معطوف شده است. بر همین اساس بسیاری از کشورها در برنامه‌ریزی توسعه تولید خود درصد قابل توجهی از تولیدات خود را مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر توربین‌های بادی، نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک، نیروگاه‌های جزرومدی، نیروگاه‌های امواج و نیروگاه‌های آبی جریانی قرار داده‌اند و انتظار می‌رود در آینده این نیروگاه‌ها نقش قابل توجهی در تأمین انرژی الکتریکی جهان داشته باشند. با رشد تکنولوژی این نیروگاه‌ها و کاهش قیمت برق تولیدی آن‌ها به دلیل کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توان رقابتی این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی افزایش می‌یابد و امید می‌رود به تدریج بتوانند جایگزین نیروگاه‌های متداول سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی گردند. اما مشکل اصلی این نیروگاه‌ها نسبت به نیروگاه‌های متداول سنتی از جمله نیروگاه‌های بخار، گازی، هسته‌ای و سیکل ترکیبی این است که به دلیل عدم قطعیت موجود در منابع انرژی تجدیدپذیر توان خروجی این نیروگاه‌ها متغیر، تصادفی و منقطع می‌باشد. به دلیل تغییر سرعت باد، میزان تابش خورشید، تغییر ارتفاع جزرومد، تغییر دبی رودخانه‌های فصلی و همچنین تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج توان خروجی مربوط به نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، آبی جریانی، جزرومدی و همچنین نیروگاه‌های امواج متغیر می‌باشد. در نیروگاه‌های متداول سنتی زمانی که نیروگاه برای یک ظرفیت نامی طراحی و ساخته می‌شود در بیشتر موارد و بر اساس تصمیم اپراتور توان خروجی نیروگاه در مقدار نامی تنظیم شده و این نیروگاه‌ها بسته به میزان بار می‌توانند توان تولیدی خود را تغییر دهند. اما در مورد نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر توان تولیدی نیروگاه در اختیار بهره‌بردار نیست و با تغییرات منابع انرژی تجدیدپذیر تغییر می‌کند بنابراین ممکن است در شرایطی که بار سیستم در حال افزایش است توان تولیدی این نیروگاه‌ها کم شود. به منظور حل این مشکل لازم است نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت هیبرید، یا در کنار ذخیره‌کننده انرژی و یا به صورت متصل به شبکه قدرت مورد بهره‌برداری قرار بگیرند.

از طرف دیگر با بالا رفتن سطح رفاه در جوامع امروز دیگر قطعی بار برای مصرف‌کنندگان قابل قبول نیست و این مصرف‌کنندگان از شرکت‌های برق انتظار دارند برق همراه با کیفیت و رعایت استانداردهای لازم و با کمترین قطعی ممکن را به آن‌ها ارائه دهند و بنابراین شرکت‌های برق سعی می‌کنند قابلیت اطمینان شبکه قدرت را تا حد امکان بالا ببرند تا مانع از بروز قطعی در شبکه گردند. بنابراین در یک شبکه قدرت باید اطمینان‌های موجود شامل سیستم تولید، انتقال و توزیع قابل اطمینان بالایی داشته باشند. بنابراین لازم است قابلیت اطمینان شبکه قدرت در شرایطی که نیروگاه‌های امواج در شبکه قدرت وجود دارند و سهم قابل توجهی را در تأمین برق دارا هستند مورد بررسی قرار گرفته و شاخص‌های مهم قابلیت اطمینان به منظور استفاده برنامه‌ریزان محاسبه شود. با توجه به متغیر بودن توان خروجی نیروگاه‌های امواج که ناشی از تغییرات ارتفاع و دوره تناوب موج می‌باشد تکنیک‌هایی که به منظور بررسی نیروگاه‌های متداول سنتی با توان ثابت می‌باشد نمی‌تواند در این زمینه مورد استفاده قرار بگیرد و لازم است به منظور مدل نمودن و در نظر گرفتن نیروگاه‌های امواج تکنیک‌های جدیدی توسعه یابد.

در زمینه قابلیت اطمینان و نیروگاه‌های امواج تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است. در [۱] تکنولوژی‌های تولید برق از انرژی اقیانوس شامل انرژی امواج، انرژی جزرومد و انرژی آبی با هد آب پایین مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲] چالش‌ها و فرصت‌های مربوط به استفاده از ماشین‌های الکتریکی مختلف شامل dc، القایی و سنکرون جهت تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند انرژی باد، امواج دریا، جزرومد و ... آورده شده است. در [۳] چگونگی اتصال به شبکه قدرت توان تولیدی نیروگاه‌های بادی، امواج و جزرومدی که مزارع آن‌ها در دریا قرار گرفته‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. در [۴]

پتانسیل منابع انرژی امواج در هند و استفاده از این انرژی به منظور تولید برق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که حدود ۷۱ درصد از سطح زمین توسط اقیانوس‌ها پوشش داده شده که می‌توان از منابع انرژی اقیانوس به مانند انرژی امواج و جزرومد به منظور تولید برق استفاده نمود. در [۵] مطالعه سیستم قدرت مبتنی بر نیروگاه‌های امواج صورت گرفته است. در این مقاله بیان شده است که انرژی پاک قابل توجهی قابل استحصال از امواج دریا و اقیانوس‌ها می‌باشد. در [۶] منابع انرژی امواج و جزرومد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق بیان شده است که در نتیجه حرکت باد بر سطح اقیانوس انرژی به صورت نوسانات مکانیکی در امواج دریا ذخیره می‌شود. در [۷] وضعیت مبدل‌های انرژی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ژنراتور با شیار مخروطی به منظور تولید برق در مبدل انرژی امواج از نوع بالارونده که دارای چندین مخزن که بر روی هم قرار گرفته‌اند بوده و انرژی امواج ورودی به صورت انرژی پتانسیل ذخیره می‌شود مورد بررسی قرار گرفته است. در [۸] شرایط امواج تابشی در نیروگاه امواج از نوع ستون آب نوسانگر مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹] طراحی یک نمونه مبدل انرژی امواج در سایت Hanstholm انجام شده است. این مبدل ترکیبی از یک مکانیزم جذب انرژی امواج با بازده بالا با یک سامانه هوشمند است که می‌تواند میزان انرژی امواج ورودی را تنظیم نموده و بارها را در شرایط امواج بسیار زیاد، کم کند. در [۱۰] تحقیقی بر روی مبدل انرژی امواج با استفاده از ژنراتور لوله‌ای خطی مغناطیس دائم انجام شده است. در این مبدل این ژنراتور به منظور افزایش چگالی توان و فاصله نسبی حرکت استفاده شده است. در [۱۱] پتانسیل انرژی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع بیان شده است که تعداد ۲۰۰ مبدل انرژی مختلف در مراحل مختلف توسعه بوده و بطور کلی سه نوع مبدل انرژی امواج شامل جاذب نقطه‌ای، موج‌شکن و قطع‌کننده موج وجود دارد. در [۱۲] مبدل‌های انرژی امواج درایو مستقیم که قسمت متحرک مبدل مستقیماً به قسمت متحرک یک ژنراتور الکتریکی کوپل شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مبدل، تجهیز مکانیکی واسط به مانند توربین و سیستم هیدرولیکی حذف شده است. در [۱۳] روش ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های انرژی امواج مبتنی بر تکنولوژی پلامیس بیان شده است. در این مقاله قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید بدون در نظر گرفتن اثر سیستم انتقال مطالعه شده است. در [۱۴] ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه شیار مخروطی که یکی از انواع مهم نیروگاه‌های امواج می‌باشد انجام شده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای این نیروگاه‌های امواج به دست آورده شده است. مقاله [۱۵] قابلیت اطمینان انواع مختلف نیروگاه‌های امواج را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله مدل قابلیت اطمینان تکنولوژی‌های مختلف نیروگاه‌های امواج شامل پلامیس، بایو، نیروگاه شیار مخروطی و اژدهای موج به دست آمده است.

تاکنون کار چندانی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب با حضور نیروگاه‌های امواج انجام نشده است. بنابراین نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

ارائه مدل قابلیت اطمینان برای نیروگاه‌های امواج

ارائه روش مناسب جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال با حضور نیروگاه‌های امواج

بررسی اثر نیروگاه‌های امواج بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل نیروگاه‌ها و خطوط انتقال

بر همین اساس در این مقاله هدف محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مرکب شامل سیستم تولید و انتقال در شرایطی که نیروگاه‌های امواج با قابلیت تولید توان الکتریکی قابل توجه در شبکه حضور دارند می‌باشد. لذا ابتدا این نیروگاه‌ها از نقطه نظر قابلیت اطمینان مدل شده و سپس تکنیک مناسب در نظر گرفتن این نیروگاه‌ها در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال معرفی می‌شود.

بنابراین ساختار این مقاله در جهت برآورده نمودن اهداف تحقیق به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه‌های امواج، انواع این نیروگاه‌ها، اساس کار و چگونگی تولید توان الکتریکی از انرژی امواج بیان می‌شود. در بخش سوم مفهوم قابلیت اطمینان در سیستم قدرت و روش پیشنهادی مقاله در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها و خطوط انتقال با حضور نیروگاه امواج بیان می‌شود. در بخش چهارم نیز نتایج عددی مربوط به محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مرکب تست استاندارد با حضور نیروگاه‌های امواج آورده شده است. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- نیروگاه‌های امواج

امواج به دلیل وجود نیروهای موجود در سطح آب ایجاد می‌شوند. نیروهای جاذبه شبیه نیروی جاذبه بین زمین، ماه و خورشید و نیروهای زمین شناسی که سبب ایجاد زلزله در زیر دریا می‌شوند و سونامی تولید می‌کنند برخی از نیروهایی هستند که در ایجاد امواج اقیانوس نقش دارند. اما نوع معمول امواج در نتیجه انرژی خورشید ایجاد می‌شود. زمانی که خورشید سطح زمین را گرم می‌کند نواحی با فشارهای مختلف تولید می‌کند که سبب ایجاد بادهای می‌شوند. زمانی که این بادهای در سطح دریا و اقیانوس‌ها می‌وزند اصطلاحاتی که بین باد و آب ایجاد می‌شود موج را به وجود می‌آورد. افزایش سرعت وزش باد سبب ایجاد امواج با ارتفاع و جرم بزرگتر شده که سریعتر در اعماق حرکت می‌کنند. اندازه امواج به سه عامل زیر بستگی دارد: قدرت وزش باد، مدت زمانی که باد می‌وزد و فاصله‌ای که باد می‌وزد.

به منظور تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی سیستم‌های مختلفی معرفی و ساخته شده‌اند که می‌توان بر اساس اصول تبدیل انرژی امواج آن‌ها را در چهار دسته قرار داد: ستون آب نوسانگر (OWC) یا terminator، موج‌شکن‌ها (attenuator)، بالا رونده بیش از حد یا بالارونده تا ارتفاع بالاتر از سطح آب دریا (overtopping) و جاذب نقطه‌ای (point absorber). ستون آب نوسانگر از یک ستون هوا که تحت تأثیر حرکت امواج به بالا و پایین حرکت می‌کند تشکیل شده است. این هوا یک توربین را به حرکت درآورده و توربین یک ژنراتور را می‌چرخاند. بطور کلی این تجهیز از یک توربین دوجته به نام Wells تشکیل شده است. این مبدل‌های چهار گانه می‌توانند به منظور استخراج انرژی امواج در سواحل، مکان‌های نزدیک ساحل و یا در اعماق اقیانوس‌ها و دور از ساحل مورد استفاده قرار بگیرند.

موج‌شکن تجهیزات شناور چند قسمتی هستند که موازی با جهت موج قرار می‌گیرند. امواج سبب می‌شود که قسمت‌ها منعطف شده و حرکت کنند. این قسمت‌ها به پمپ‌های هیدرولیکی یا مبدل‌ها متصل هستند. نمونه ساخته شده و پرکاربرد تکنولوژی موج‌شکن پلامیس (Pelamis) است. این تجهیز یک سیلندر شناور هیدرولیکی به طول ۱۵۰ متر است که توان نامی ۷۵۰ کیلووات دارد. از ۴ قسمت متصل به هم که قابلیت حرکت نسبت به هم دارند تشکیل شده است. همچنین پمپ موج که دارای سه pontoon است و به صورت خطی به هم متصل شده‌اند و به صورت موازی با جهت موج قرار گرفته‌اند از این نوع تکنولوژی است. جاذب نقطه‌ای از بالا و پایین رفتن موج به منظور تولید برق استفاده می‌کند. تکنولوژی بایو بر اساس این نوع مبدل می‌باشد. نوسانگر موج ارشمیدس نیز که از یک شناور تشکیل شده است که محرک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم خطی را حرکت می‌دهد و از انرژی پتانسیل امواج برق تولید می‌کند از این نوع تکنولوژی می‌باشد. ستون آب نوسانگر یا terminator تجهیز است که از یک محفظه هوا که بالای سطح اقیانوس قرار دارد تشکیل شده است. زمانی که موج وارد محفظه می‌شود سبب می‌شود که بالا و پایین شده، فشار هوای درون حفره را افزایش و کاهش دهد. هوا یک توربین را چرخانده و توربین نیز یک ژنراتور را می‌چرخاند و برق تولید می‌شود. به خاطر اینکه جهت حرکت هوا تغییر می‌کند یک توربین Wells که یک توربین هوایی دو جهته است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تجهیز بالارونده زیاد (overtopping) امواج به درون یک جمع‌کننده یا قیف هدایت شده و سپس آب به یک توربین هیدرولیکی که با یک ژنراتور کوپل شده است وارد می‌شود. یک نمونه از این نوع تکنولوژی اژدهای موج (wave dragon) می‌باشد.

۳- قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها و خطوط انتقال با حضور نیروگاه‌های امواج

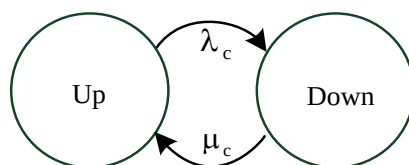
قابلیت اطمینان سیستم قدرت میزان توانایی این سیستم در تأمین برق مشترکین به صورت پیوسته همراه با کیفیت مطلوب و رعایت استانداردهای مربوطه می‌باشد. این توانایی در دو بخش کفایت و امنیت سیستم قدرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. کفایت سیستم قدرت زمانی فراهم می‌شود که امکانات کافی در قسمت‌های تولید، انتقال و توزیع فراهم باشد که بتواند تقاضای بار را همراه با رعایت قیود بهره‌برداری پاسخگو باشد. امنیت سیستم قدرت به توانایی این سیستم در پاسخ به هرگونه اغتشاش نظیر از دست رفتن یک واحد تولیدی و یا قطع خطوط انتقال گفته می‌شود. مطالعات قابلیت اطمینان برای سیستم‌های قدرت با توجه به وجود قسمت‌های اساسی تولید، انتقال و توزیع در سه سطح سلسله مراتبی انجام می‌شود. در سطح اول

(HLI) تنها قسمت تولید در نظر گرفته شده و توانایی واحدهای تولیدی موجود در تأمین کل بار بدون در نظر گرفتن قسمت-های انتقال و توزیع بررسی می‌شود. در سطح دوم (HLII) در کنار بخش تولید، بخش انتقال نیز در نظر گرفته شده و توانایی سیستم مرکب در تغذیه بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در سطح سوم (HLIII) هر سه قسمت تولید، انتقال و توزیع در مطالعات وارد می‌شوند اما به دلیل حجم محاسبه و پیچیدگی زیاد تنها قسمت توزیع با استفاده از نتایج به دست آمده در سطوح قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

دو روش در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان قابل استفاده است: یکی روش تحلیلی که سیستم را با مدل ریاضی نمایش داده و شاخص‌های قابلیت اطمینان را از حل مستقیم عددی به دست می‌آورد و دیگری روش شبیه‌سازی که شاخص-های قابلیت اطمینان را با شبیه‌سازی فرایند واقعی و رفتار تصادفی سیستم تخمین زده و مسئله را به صورت یک سری تجربه و آزمایش واقعی با لحاظ نمودن کلیه حالت‌ها و پیشامدهای موجود بررسی می‌نماید. بنابراین روش شبیه‌سازی نیاز به تکرار تا چند هزار سال و حجم محاسباتی زیاد خواهد داشت. معمولاً شبیه‌سازی مبتنی بر روش مونت‌کارلو بوده که به دو صورت غیرترتیبی و ترتیبی انجام می‌شود. در نوع ترتیبی، ترتیب زمانی اهمیت داشته و گذشته سیستم بر نتایج بعدی سیستم تأثیر دارد. روش تحلیلی در مقایسه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو حجم محاسباتی کمتری داشته و مشکلاتی نظیر ابهام در جواب و عدم همگرایی را نخواهد داشت. در روش تحلیلی برای هر کدام از المان‌های موجود در سیستم باید یک مدل قابلیت اطمینان ارائه شود. برای به دست آوردن این مدل مراحل زیر طی می‌گردد:

- شناخت کل سیستم و چگونگی عملکرد آن
- تعیین اجزای سیستم و مشخص نمودن زیرسیستم‌های مربوطه
- چگونگی خراب شدن هر کدام از اجزا و به دست آوردن مدل مارکوف مربوط به آن‌ها
- تأثیر خرابی هر کدام از اجزا بر عملکرد کل سیستم
- تعیین مدل قابلیت اطمینان کل سیستم از ترکیب مدل بدست آمده برای هر کدام از زیرسیستم‌ها

مدل مارکوف، حالت‌های مختلفی را که یک المان در طول عملکرد خود دارا می‌باشد در نظر گرفته و نرخ رفتن این المان از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل احتمال حالت‌های مختلف، فرکانس و همچنین تداوم این حالت‌ها تعیین می‌گردد. در شکل ۱ یک مدل مارکوف دو حالتی که برای یک المان، دو وضعیت سالم بودن و خرابی را در نظر می‌گیرد نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است المان با نرخ خرابی λ_c از وضعیت سالم به وضعیت خراب و با نرخ تعمیر μ_c از وضعیت خراب به وضعیت سالم می‌رود.



شکل (۱): مدل مارکوف دو حالتی

احتمال سالم (P^{UP}) و خراب بودن المان (P^{DOWN}) در زمان عمر مفید (در این دوره نرخ خرابی ثابت است) بر اساس روابط (۱) به دست آورده می‌شوند. این روابط برای انجام مطالعات برنامه‌ریزی که زمان مطالعه به اندازه کافی بزرگ است برقرار می‌باشند و برای انجام مطالعات بهره‌برداری که زمان مطالعه کوتاه و در محدوده چند ساعت است نمی‌توانند استفاده شوند.

$$P_c^{UP} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, P_c^{DOWN} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} \quad (۱)$$

در این قسمت تکنیک ارزیابی کفایت سیستم قدرت در سطح دوم (سیستم مرکب تولید و انتقال) به روش تحلیلی بیان و نحوه محاسبه شاخص‌های مهم این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح دو (HLII) به بررسی میزان قابلیت سیستم قدرت متشکل از منابع تولید و خطوط انتقال در تأمین بار می‌پردازد. در این مطالعات خرابی خطوط انتقال و واحدهای تولید در نظر گرفته شده و بر این اساس شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه می‌گردد. دو دسته شاخص در این سطح تعیین می‌گردد:

دسته اول شاخص‌های قابلیت اطمینان مربوط به نقاط بار می‌باشد. بر اساس این شاخص‌ها می‌توان وضعیت نقاط بار مختلف سیستم را بررسی و نقاط ضعف و قوت سیستم را شناخت. این نتایج در اولویت بندی نقاطی از سیستم که باید تقویت گردند استفاده می‌شود. برخی از شاخص‌های نقاط بار که در این تحقیق نیز محاسبه می‌گردند در زیر آورده شده است:

احتمال قطع بار: این شاخص برابر با جمع احتمالات مربوط به حالت‌هایی است که سیستم مرکب قادر نیست بار مورد نظر را تأمین نماید و به عبارت دیگر در این حالت‌ها توان انتقال یافته در نقطه بار، از بار مورد نیاز کمتر است. این شاخص از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q_s = \sum_{i=1}^n P_i B_i \quad (2)$$

در رابطه فوق P_i احتمال حالت i ام، B_i عدد باینری به صورت ۰ و ۱ است که عدد ۱ نشان دهنده این است که در حالت مورد نظر توان انتقال یافته به بار از آن کوچکتر بوده و در نتیجه منجر به قطع بار می‌گردد. همچنین n نیز تعداد کل حالات می‌باشد.

متوسط مدت زمان قطع بار: این شاخص برابر با مدت زمانی از سال است که بار قطع می‌گردد و طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در این رابطه نیز P_i احتمال حالت i ام، B_i عدد باینری به صورت ۰ و ۱ است که عدد ۱ نشان دهنده این است که در حالت مورد نظر توان انتقال یافته به بار از آن کوچکتر بوده و در نتیجه منجر به قطع بار می‌گردد. همچنین n نیز تعداد کل حالات می‌باشد.

$$LOLE = \sum_{i=1}^n P_i B_i \times 8760 \quad (3)$$

متوسط انرژی تأمین نشده: این شاخص نیز برابر با میزان انرژی است که در طول یک سال سیستم قادر نیست فراهم نماید و از رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$EENS = \sum_{i=1}^n L_i P_i \times 8760 \quad (4)$$

در این رابطه نیز P_i احتمال حالت i ام، n تعداد کل حالات و L_i میزان باری است که سیستم در حالت i ام نمی‌تواند تأمین نماید.

دسته دوم اندیس‌های سیستم مرکب بوده که برای مدیران صنعت برق به منظور ارزیابی کلی سیستم اهمیت دارد. در این مقاله هدف این است که در مرحله اول چگونگی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب در حضور نیروگاه‌های امواج معرفی شود و در مرحله بعد تأثیر این واحدها بر قابلیت اطمینان این سیستم در نقاط بار مختلف مطالعه گردد. بنابراین در این قسمت تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل منابع تولید متعارف در سطح دوم تشریح می‌گردد. به منظور ارزیابی تحلیلی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح دو شامل منابع تولید متعارف، از روش آنالیز پیشامدها استفاده می‌گردد. برای هر کدام

از المان‌های این سیستم شامل واحدهای تولید متعارف و خطوط انتقال یک مدل دو حالت به صورت سالم و خراب در نظر گرفته شده و بر این اساس تمام حالت‌های ممکن مشخص می‌گردد. هر کدام از این حالت‌ها یک پیشامد نامیده شده که اگر یک سیستم مرکب m واحد تولید و k خط انتقال داشته باشد می‌توان $n=2^{m+k}$ پیشامد برای آن متصور شد. با توجه به اینکه در یک سیستم قدرت تعداد منابع تولید و خطوط انتقال بسیار زیاد می‌باشد در نظر گرفتن تمامی پیشامدها سبب زیاد شدن حجم محاسبات و پیچیدگی مسئله می‌گردد. بر این اساس از بین حالت‌های موجود تعدادی حالت انتخاب و حالت‌های با احتمال بسیار کوچک کنار گذاشته می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان تنها حالت‌های شامل تا حداکثر دو خرابی (چه برای واحدهای تولید و چه برای خطوط انتقال) را در نظر گرفت و از بقیه خرابی‌ها صرف نظر نمود. در مرحله بعد باید تعیین شود که تأثیر پیشامدهای به دست آمده بر نقاط بار مختلف سیستم چگونه است. اگر در یکی از حالت‌ها، توان تولیدی در یک نقطه بار کمتر از بار مورد نظر باشد ابتدا با انجام اعمال اصلاحی به مانند تغییر آرایش سیستم قدرت مشکل برطرف گردد و اگر این اعمال نتوانند از قطعی بار جلوگیری نمایند به ناچار همه بار یا قسمتی از آن قطع می‌گردد. باید توجه داشت که در این مرحله قطع بار بر اساس اولویت‌بندی انجام می‌شود؛ به این معنا که ابتدا بارهای کم اهمیت قطع شده و اگر مشکل برطرف نشد به ناچار در نهایت بارهای پراهمیت نیز قطع می‌شوند. میزان اهمیت بار می‌تواند بر اساس قیمت برق در باس‌های مختلف، اهمیت مصرف‌کننده به لحاظ سیاسی، اجتماعی و ... تعیین شود. در این تحقیق اولویت بندی قطع بار بر اساس میزان ارزش بارهای قطع شده ($VOLL_i$) می‌باشد. به این ترتیب با بررسی پیشامدهای تعیین شده شاخص‌های قابلیت اطمینان در نقاط مختلف بار به دست می‌آید. به منظور بررسی تأثیر خطوط انتقال بر سیستم قدرت به سه صورت می‌توان پخش بار را انجام داد:

- حالت اول که ساده‌ترین روش می‌باشد پخش بار شبکه نام دارد و تنها خطوط انتقال به عنوان اتصال دهنده بین باس‌های مختلف مطالعه می‌شوند.
 - در روش دوم که پخش بار جریان مستقیم نامیده می‌شود، ظرفیت خطوط انتقال نیز در مطالعات اهمیت دارد. در اینگونه مطالعات ممکن است با قطع یکی از خطوط و یا واحدهای تولیدی خطوط دیگر دچار اضافه بار شوند که حد حرارتی این خطوط اجازه نمی‌دهد بار آن‌ها از مقدار نامی تجاوز نماید.
 - روش سوم که کاملترین و در عین حال پیچیده‌ترین روش می‌باشد علاوه بر ظرفیت خطوط محدودیت مربوط به ولتاژ و توان راکتیو را نیز در نظر می‌گیرد. این روش پخش بار جریان متناوب نام دارد.
- در این تحقیق به منظور بررسی خطوط انتقال از روش دوم استفاده شده و تنها محدودیت حرارتی خطوط که سبب می‌شود میزان توان اکتیو عبوری محدود و مشخص باشد، مد نظر قرار می‌گیرد. همان‌گونه که گفته شد به منظور انجام مطالعه قابلیت اطمینان در سطح دوم به ازای هر کدام از پیشامدها در صورتی که بار مورد نیاز در یک نقطه بار نتواند تأمین شود باید قطع بار انجام شود. در این پیشامدها باید به گونه‌ای عمل شود که این قطع بار بهینه‌ترین حالت ممکن باشد. در ادامه الگوریتم قطع بار بهینه تشریح می‌گردد. زمانی که یک پیشامد با احتمال مربوطه در نظر گرفته می‌شود باید تعیین شود که در بهینه‌ترین حالت در نقاط بار میزان قطعی بار چقدر است. به عبارت دیگر تابع هدف زیر باید بهینه شود:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i VOLL_i \quad (5)$$

در رابطه فوق C_i میزان بار قطع شده در باس i ام و $VOLL_i$ ارزش قطعی بار در این باس می‌باشد. محدودیت‌های بهینه‌سازی در این مسئله عبارتند از:

میزان توان تولیدی باید با توان مصرفی برابر باشد:

$$\sum_{i \in NG} PG_i = \sum_{i \in ND} PD_i - \sum_{i \in ND} C_i \quad (6)$$

توان تولیدی نیروگاه‌ها باید در محدوده مجاز باشد:

$$PG_{i \min} \leq PG_i \leq PG_{i \max} \quad (i \in NG) \quad (7)$$

میزان بار قطع شده در هر نقطه بار باید بین صفر تا مقدار بار متصل به آن باس باشد:

$$0 \leq C_i \leq PD_i (i \in ND) \quad (8)$$

توان عبوری از هر خط انتقال نباید از ظرفیت نامی خط تجاوز کند:

$$T_k(S) \leq T_{kmax} (k \in NL) \quad (9)$$

در روابط فوق PD_i , PG_i , C_i , PG_{imax} , T_k , T_{kmax} , NG , ND و NL به ترتیب توان تولیدی باس i ، توان بار باس i ، بار قطع شده در باس i ، مینیمم توان تولیدی ژنراتور باس i ، ماکزیمم توان تولیدی ژنراتورها در باس i ، ظرفیت خط lk ، ماکزیمم ظرفیت خط lk ، تعداد ژنراتورها، تعداد بارها و تعداد خطوط می‌باشد. توان بار در باس i ، ظرفیت خطوط در پیشامدهای مختلف از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T(S) = A(S)(PG - PD + C) \quad (10)$$

سطر m مربوط به ماتریس A نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود که در این رابطه $Z_r(S)$ و $Z_q(S)$ سطرهای r ام و q ام از ماتریس $Z(S)$ می‌باشند (q و r شماره شین‌های متصل به دو سر خط انتقال مورد نظر هستند). ماتریس $Z(S)$ ماتریس Z_{bus} شبکه در شرایط پیشامد S بوده و از معکوس گرفتن ماتریس Y_{bus} بدست می‌آید. البته روش‌هایی نیز وجود دارد که به صورت مستقیم این ماتریس را تعیین می‌کند. در این روش‌ها ابتدا یک باس در نظر گرفته شده و ماتریس Z_{bus} مربوط به آن تعیین می‌شود؛ سپس این ماتریس با اضافه نمودن باس‌های دیگر و خطوط اتصالی گسترش یافته و ماتریس Z_{bus} سیستم بدست می‌آید.

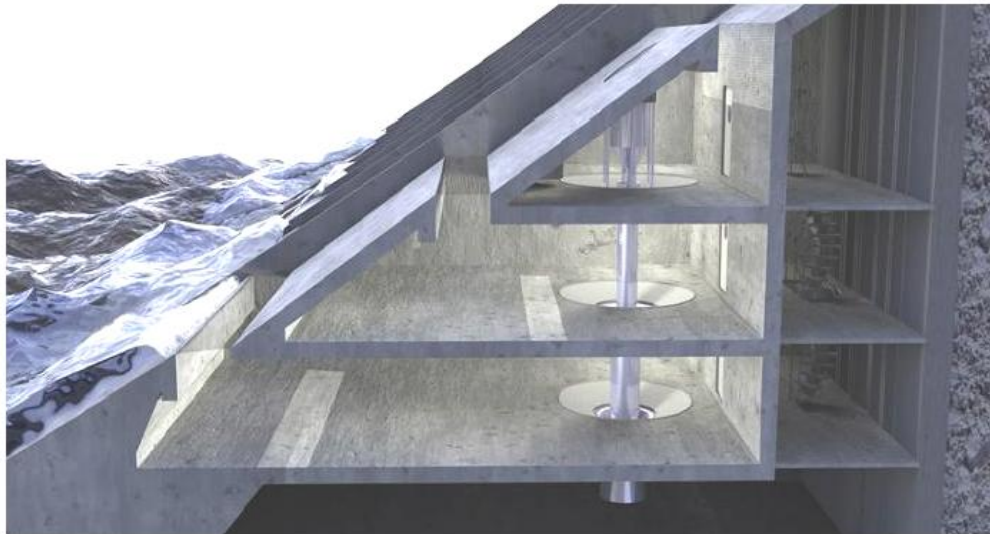
$$A_m(S) = \frac{Z_r(S) - Z_q(S)}{X_m} \quad (11)$$

به منظور بهینه‌سازی تابع هدف آورده شده در رابطه ۵ با رعایت محدودیت‌های بیان شده در فوق از روش برنامه‌ریزی خطی در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. این نرم‌افزار مسائل بهینه‌سازی را به روش نقطه داخلی حل می‌کند. روش گفته شده در فوق برای واحدهای تولید متعارف که تنها به صورت دو حالت سالم و خراب مدلسازی می‌شوند مناسب است. همانگونه که گفته شد نیروگاه‌های امواج به دلیل متغیر بودن ارتفاع و دوره تناوب امواج دارای تغییرات زیادی در توان خروجی خود بوده و بنابراین مدل قابلیت اطمینان آن‌ها چند حالتی (بیش از دو حالت) خواهد بود. بنابراین در صورتی که یک نیروگاه امواج با مدل کامل چند حالتی (به عنوان نمونه m حالتی) مدل شود تکنیک ارزیابی مطالعه قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال به صورت زیر خواهد بود. با اضافه شدن یک نیروگاه m حالتی به سیستم مرکب تعداد پیشامدهای حاصل m برابر شده که تحلیل آن مشکل می‌باشد. به همین منظور از روش احتمال شرطی استفاده می‌شود. بر این اساس هر کدام از m حالت به صورت جداگانه و با احتمال واحد به سیستم مرکب اضافه شده، شاخص قابلیت اطمینان در هر کدام از این حالت‌ها محاسبه شده و در نهایت از مجموع وزن داده شده این شاخص‌ها در احتمال مربوطه مقدار نهایی شاخص به صورت رابطه ۱۲ تعیین می‌شود.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k P(\text{state } k) \quad (12)$$

در این بخش چگونگی تعیین مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه امواج بیان شده است. این مدل هم باید خرابی‌های المان‌های تشکیل دهنده و هم تغییرات توان خروجی نیروگاه به دلیل تغییر در ارتفاع و دوره تناوب موج مدل نماید. با توجه به اینکه تغییرات توان خروجی این نیروگاه‌ها زیاد است این مدل با مدل مربوط به نیروگاه‌های متداول سنتی که تنها دو حالت سالم و خراب دارند متفاوت بوده و بیش از دو حالت خواهد داشت. یکی از مبدل‌های انرژی امواج که دارای ظرفیت زیاد بوده و توان خروجی آن می‌تواند از طریق سیستم انتقال به شبکه قدرت تزریق شود نیروگاه انرژی امواج از نوع ژنراتور شیار مخروطی دریا (SSG: sea slot cone generator) می‌باشد. شماتیک این تجهیز در شکل ۲ آورده شده است. این مبدل انرژی امواج از نوع بالارونده بوده و دارای چندین مخزن قرار گرفته بر روی هم می‌باشد که انرژی امواج ورودی به صورت انرژی پتانسیل آب قرار

گرفته در مخازن واقع شده در سطحی بالاتر از سطح آب دریا ذخیره می‌شود. آب ذخیره شده سپس با حرکت به سمت پایین توربین‌ها را می‌چرخاند و در نتیجه برق تولید می‌شود. اجزای تشکیل دهنده این مبدل انرژی امواج عبارتند از: یک ساختار بالارونده که در هنگام بروز امواج آب را به سمت مخازن واقع در سطوح بالاتر از سطح آب دریا هدایت می‌کند، شیارهای مخروطی که آب ذخیره شده در مخازن چند طبقه از درون آن‌ها عبور کرده و به سمت توربین هدایت می‌شود، توربین که با چرخش آن ژنراتورهای کوپل شده به آن نیز می‌چرخد، ژنراتور که با چرخش خود برق تولید می‌کند، کابل‌های قدرت که انرژی الکتریکی تولیدی را به ساحل منتقل نموده، ترانسفورماتور که سطح ولتاژ را به سطح ولتاژ مناسب شبکه رسانده و مبدل الکترونیک قدرت که ولتاژ و فرکانس را به مقادیر مناسب و قابل اتصال به شبکه کنترل می‌کند. در جدول ۱ ماتریس توان یک نیروگاه مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی ۲۰ مگاواتی آورده شده است.



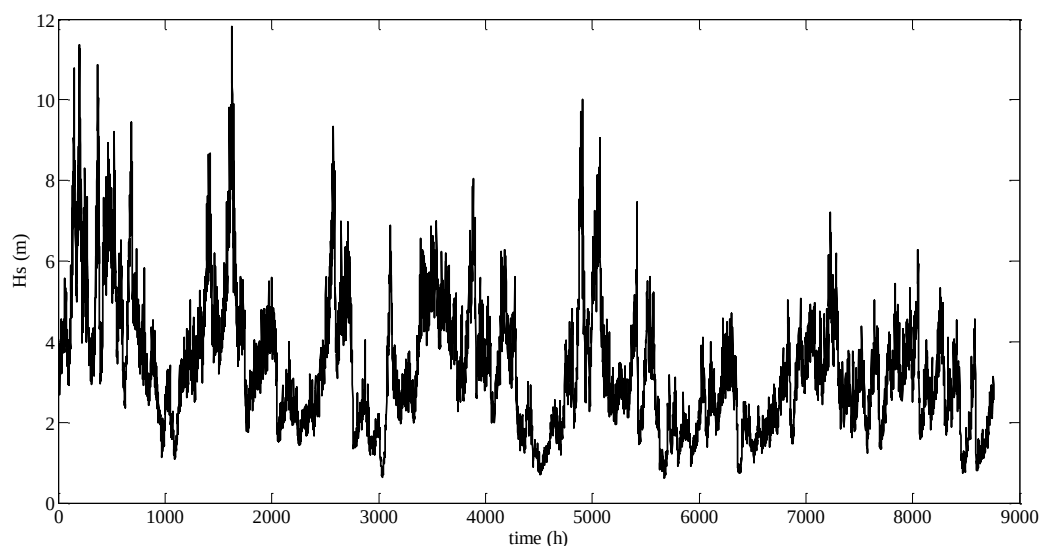
شکل (۲): ژنراتور امواج شیار مخروطی

جدول (۱): ماتریس توان نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی SSG با توان نامی ۲۰ مگاوات

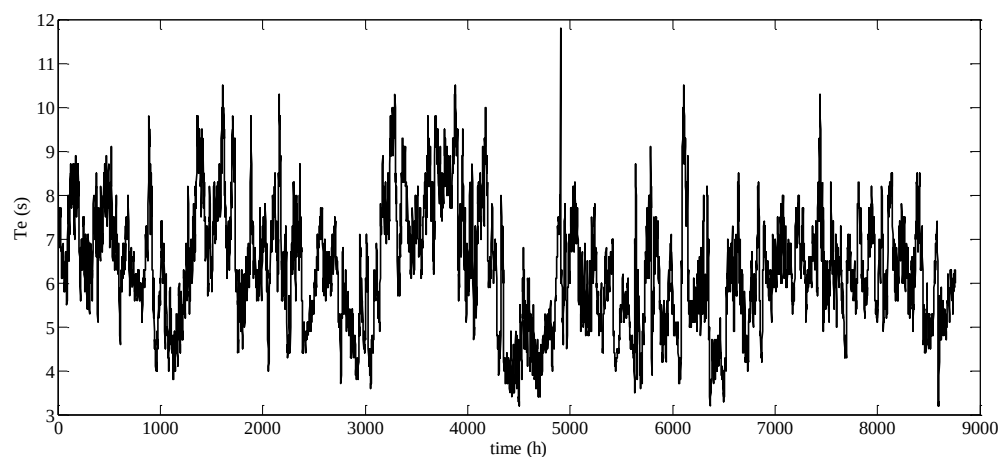
$T_e (s) \ H_s (m)$	Power matrix (in kW)													
	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5
0.5	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	198	208	218	228
1	397	437	476	516	556	595	635	675	715	754	794	833	873	913
1.5	893	982	1072	1161	1250	1340	1429	1518	1608	1697	1786	1875	1965	2054
2	1588	1746	1905	2064	2223	2381	2540	2699	2858	3016	3175	3334	3493	3651
2.5	2481	2729	2977	3225	3473	3721	3969	4217	4465	4713	4961	5209	5457	5705
3	3572	3929	4287	4644	5001	5358	5715	6073	6430	6787	7144	7501	7859	8216
3.5	4862	5348	5834	6321	6807	7293	7779	8265	8751	9238	9724	10210	10695	11183
4	6350	6985	7620	8256	8891	9526	10161	10796	11431	12066	12701	13336	13971	14606
4.5	8037	8841	9645	10448	11252	12056	12860	13663	14467	15271	16074	16878	17682	18486
5	9923	10915	11907	12899	13892	14884	15876	16868	17860	18853	19845	20837	21829	22821
5.5	12,006	13,207	14,407	15,608	16,809	18,009	19,210	20,410	21,611	22,811	24,012	25,212	26,413	27,613
6	14,288	15,717	17,146	18,575	20,000	21,429	22,858	24,287	25,716	27,145	28,574	30,003	31,432	32,861
6.5	16,769	18,446	20,123	21,800	23,477	25,154	26,831	28,508	30,185	31,862	33,539	35,216	36,893	38,570
7	19,448	21,375	23,302	25,229	27,156	29,083	31,010	32,937	34,864	36,791	38,718	40,645	42,572	44,499
7.5	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
8	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000

همانگونه که در جدول ۱ مشخص است ماتریس توان این مبدل انرژی امواج بیان می‌کند به ازای ارتفاع غالب موج (H_s) و همچنین دوره تناوب عبور از صفر امواج (T_e)، توان خروجی نیروگاه چقدر است. بنابراین می‌توان با داشتن مقادیر ساعت به ساعت ارتفاع و دوره تناوب موج، توان خروجی ساعت به ساعت نیروگاه را تعیین نمود. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب ارتفاع

غالب موج و همچنین دوره تناوب عبور از صفر آن به صورت ساعت به ساعت در طول سال ۲۰۱۷ برای یک منطقه مستعد نشان داده شده است. با استفاده از داده‌های ارتفاع و دوره تناوب امواج و به کمک ماتریس توان نیروگاه مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی دریا، توان خروجی این مبدل به صورت ساعت به ساعت به دست آمده و در شکل ۵ نشان داده شده است. البته در محاسبه این توان در هنگامی که ارتفاع و دوره تناوب موج بین دو مقدار بیان شده در ماتریس توان قرار دارند از میان‌یابی استفاده شده است.



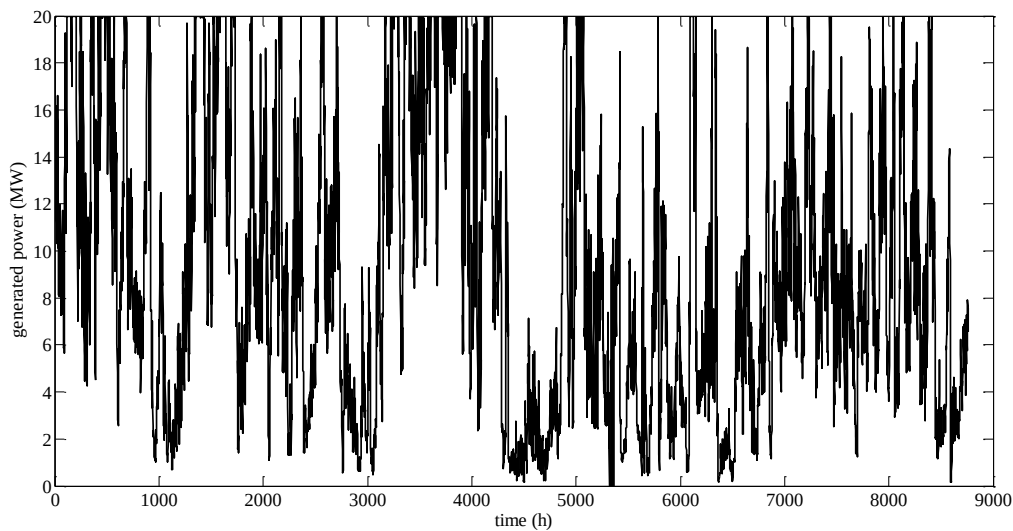
شکل (۳): نمودار ساعت به ساعت تغییرات ارتفاع غالب امواج



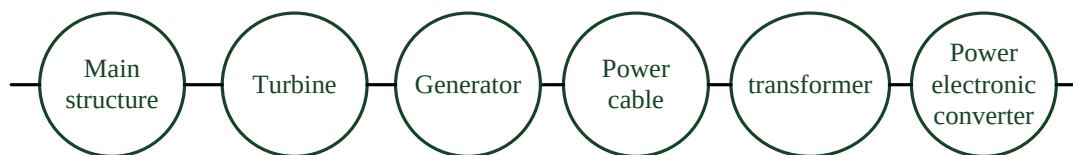
شکل (۴): نمودار ساعت به ساعت تغییرات دوره تناوب امواج

به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه امواج مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی دریا هم باید تأثیر خرابی اجزای تشکیل دهنده بر خرابی کل سیستم در نظر گرفته شود و هم تأثیر تغییرات توان خروجی به دلیل تغییرات ارتفاع و دوره تناوب امواج. همانگونه که گفته شد اجزای تشکیل دهنده این مبدل عبارتند از: ساختار مبدل شامل بدنه مبدل، مخازن چند طبقه و شیارهای مخروطی، توربین، ژنراتور، کابل، ترانسفورماتور و مبدل الکترونیک قدرت. با خراب شدن هر کدام از این اجزا، عملکرد این مبدل با مشکل روبه‌رو شده و مبدل قادر نخواهد بود توان الکتریکی تولید کند. بنابراین از نقطه‌نظر قابلیت اطمینان چون

خرابی هر کدام از این المان‌ها منجر به توان صفر مبدل و خرابی کل سیستم می‌شود این المان‌ها با هم سری می‌باشند. در شکل ۶ مدل قابلیت اطمینان مبدل که از اتصال سری این اجزا تشکیل شده است نشان داده شده است.



شکل (۵): توان تولیدی نیروگاه مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی



شکل (۶): مدل قابلیت اطمینان مبدل انرژی امواج مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی دریا

پارامترهای مدل قابلیت اطمینان معادل یک سیستم به مانند شکل ۶ که اجزای تشکیل دهنده آن از نقطه نظر قابلیت اطمینان به صورت سری با هم قرار گرفته‌اند به صورت روابط ۱۳ می‌باشد. در این روابط λ_i نرخ خرابی المان λ ، نرخ خرابی معادل کل سیستم، r_i زمان تعمیر المان λ ، r زمان تعمیر معادل کل سیستم، U_i عدم دسترس پذیری المان λ و U عدم دسترس پذیری معادل کل سیستم می‌باشد.

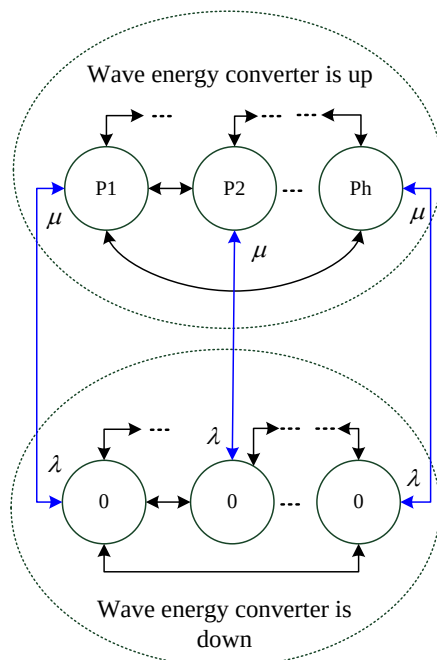
$$\lambda = \sum \lambda_i, U = \sum U_i, r = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_i} \quad (13)$$

بنابراین با معادل نمودن مدل قابلیت اطمینان کل سیستم بر اساس رابطه فوق می‌توان مدل قابلیت اطمینان دو حالتی این تجهیز را با دو حالت سالم با ظرفیت نامی و خراب با ظرفیت صفر به دست آورد. مقدار نرخ خرابی مربوط به مدل با توجه به اتصال سری اجزای تشکیل دهنده در مدل قابلیت اطمینان عبارت است از:

$$\lambda = \lambda_{main\ structure} + \lambda_{turbine} + \lambda_{generator} + \lambda_{transformer} + \lambda_{cable} + \lambda_{converter} \quad (14)$$

به دلیل عدم قطعیت موجود در ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان خروجی نیروگاه امواج دارای تعداد زیادی حالت می‌باشد که برای انجام مطالعات قابلیت اطمینان به روش تحلیلی مناسب نیست. بنابراین باید به کمک یکی از تکنیک‌های خوشه‌بندی تعداد این حالت‌ها کاهش یابد. در این مقاله پیشنهاد شده است از روش خوشه‌بندی فازی استفاده شود. این الگوریتم یکی از

مهمترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی می‌باشد. اگر یک مبدل انرژی امواج مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیپار مخروطی دریا در نظر گرفته شود و این‌گونه فرض شود که داده‌های ارتفاع و دوره تناوب امواج و همچنین ماتریس توان این نیروگاه‌های امواج با اعمال خوشه‌بندی به تعداد h حالت مختلف (کلاستر) منجر شود (توان‌های از P_1 تا P_h)، مدل قابلیت اطمینان کامل این نیروگاه به صورت نشان داده شده در شکل ۷ خواهد بود.



شکل (۷): مدل قابلیت اطمینان کامل نیروگاه ژنراتور شیپار مخروطی دریا

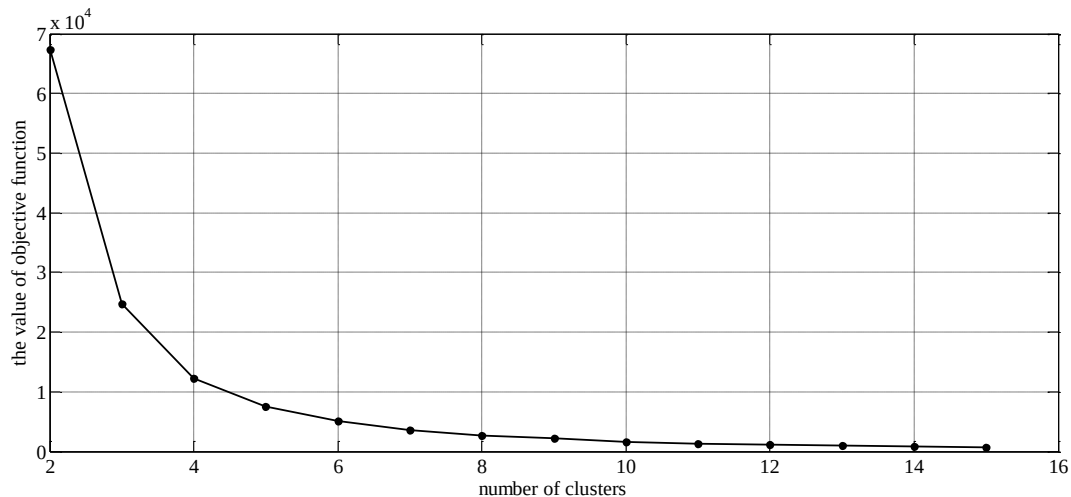
مقادیر ظرفیت مربوط به هر کدام از حالت‌ها، احتمال آن‌ها و نرخ گذر بین حالت‌های مختلف به راحتی بر اساس روابط قابلیت اطمینان به دست می‌آید. همان‌گونه که مشخص است این مدل قابلیت اطمینان دارای تعداد $2h$ حالت می‌باشد که برخی از حالت‌ها ظرفیت یکسانی دارند. در این مدل حالت‌های با ظرفیت یکسان می‌توانند با هم ترکیب شده و بر این اساس یک مدل با تعداد حالت‌های کمتر و غیرتکراری برای نیروگاه امواج به دست می‌آید. احتمال، فرکانس و نرخ گذر مربوط به حالت‌های با ظرفیت یکسان از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$P_C = \sum P_i, f_C = \sum f_i, \lambda_C = \frac{\sum \lambda_i P_i}{P_C} \quad (15)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت یک نیروگاه امواج نمونه که مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیپار خطی دریا می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه به دست آمده و سپس از این مدل به منظور ارزیابی کیفیت سیستم‌های مرکب تولید و انتقال RBTS و IEEE-RTS استفاده می‌شود. در این قسمت یک نیروگاه امواج ۲۰ مگاواتی مبتنی بر ژنراتور شیپار مخروطی دریا که قابلیت تولید ۲۰ مگاوات توان الکتریکی در حالت ماکزیمم را دارد با مشخصات بیان شده در قبل در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود نرخ خرابی و تعمیر اجزای این نیروگاه به گونه‌ای است که منجر به نرخ خرابی و تعمیر معادل به ترتیب ۲ و ۹۸ بار در سال شود. بنابراین احتمال سالم بودن این مبدل (دسترس‌پذیری آن) ۰/۹۸ خواهد بود. فرض می‌شود این نیروگاه در منطقه‌ای نصب شده که داده‌های ساعت به ساعت ارتفاع و دوره تناوب امواج در این منطقه به صورت نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴

باشد. با استفاده از ماتریس توان نشان داده شده در جدول ۱ و این داده‌های امواج، توان تولیدی نیروگاه در بازه‌های زمانی ساعت به ساعت به صورت نشان داده شده در شکل ۵ خواهد بود. در ادامه از روش خوشه‌بندی فازی استفاده شده و تعداد حالت‌های توان خروجی این نیروگاه کاهش داده می‌شود. در شکل ۸ نمودار تابع هدف روش خوشه‌بندی بر حسب تعداد کلاسترها رسم شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش تعداد خوشه‌ها مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد، اما به ازای تعداد ۶ کلاستر مقدار کاهش تابع هدف کم شده و بنابراین با تقریب خوبی می‌توان به کمک ۶ کلاستر نیروگاه امواج مورد مطالعه را مدل نمود. در جدول ۲ توان هر کدام از این کلاسترها و احتمال مربوطه نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار تابع هدف خوشه‌بندی بر حسب تعداد کلاسترها

جدول (۲): نتایج خوشه‌بندی

Capacity (MW)	Probability
0	0.203196
4.8	0.199658
7.9	0.193265
11.3	0.144178
15.1	0.101598
20	0.158105

در این قسمت تأثیر خرابی اجزای تشکیل دهنده بر مدل قابلیت اطمینان نیروگاه امواج مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه ۱۲ حالتی می‌باشد که ۷ حالت آن دارای توان صفر خواهد بود. بنابراین مدل کامل قابلیت اطمینان این نیروگاه به صورت نشان داده شده در جدول ۳ خواهد بود.

جدول (۳): مدل قابلیت اطمینان کامل نیروگاه امواج

Capacity (MW)	Probability
0	0.219132
4.8	0.195664
7.9	0.189400
11.3	0.141295
15.1	0.099566
20	0.154943

در ادامه از این مدل قابلیت اطمینان به دست آمده به منظور ارزیابی کفایت سیستم‌های قدرت مرکب تولید و انتقال RBTS و IEEE-RTS استفاده می‌شود. به منظور انجام مطالعه قابلیت اطمینان برای این سیستم پیشنهادی با ۴ خرابی در واحدهای

تولید، ۳ خرابی در خطوط انتقال و همزمان ۳ خرابی در واحدهای تولید و خطوط انتقال در نظر گرفته شده است. در این مطالعات دو حالت در نظر گرفته شده است: حالت اول سیستم RBTS پایه بدون اضافه شدن واحد جدید و حالت دوم سیستم RBTS که به باس سوم آن یک نیروگاه امواج ۲۰ مگاواتی مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی دریا با مشخصات گفته شده اضافه شده است، می‌باشد. با استفاده از روش پیشنهادی برای هر کدام از این حالت‌ها شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار شامل احتمال قطع بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تأمین نشده در هر نقطه بار محاسبه و به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. همان‌گونه که در این جداول مشخص است در سیستم RBTS شاخص‌های قابلیت اطمینان در باس سوم وضعیت خوبی ندارند و در مواقع قطع بار به دلیل اینکه این باس ارزش قطع بار کمی دارد در اولویت قطع قرار می‌گیرد. با اضافه شدن نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیار مخروطی دریا با توان نامی ۲۰ مگاوات به باس سوم قابلیت اطمینان این باس بهبود پیدا کرده است.

جدول (۴): احتمال قطع بار در نقاط بار مختلف برای سیستم RBTS

<i>Load points</i>	<i>Loss of load probability</i>	<i>Loss of load expectation (hrs/yr)</i>	<i>Expected energy not supplied (MWh/yr)</i>
2	0	0	0
3	0.0086	75.34	6403.9
4	0	0	0
5	1.2733e-06	0.01115	0.223
6	0.00113913	9.9787788	199.575576

جدول (۵): احتمال قطع بار در نقاط بار برای سیستم RBTS با اضافه شدن یک نیروگاه امواج ۲۰ مگاواتی به باس سوم

<i>Load points</i>	<i>Loss of load probability</i>	<i>Loss of load expectation (hrs/yr)</i>	<i>Expected energy not supplied (MWh/yr)</i>
2	0	0	0
3	0.004977	43.68612	3713.3202
4	0	0	0
5	1.2701E-06	0.0111261	0.222522
6	0.0011387	9.975012	199.50024

جدول (۶): احتمال قطع بار در نقاط بار برای سیستم IEEE RTS پایه

<i>Load points</i>	<i>Loss of load probability</i>	<i>Loss of load expectation (hrs/yr)</i>	<i>Expected energy not supplied (MWh/yr)</i>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	2.35e-7	0.0020586	0.370548
4	4.70e-8	0.0004117	0.030466
5	3.80e-8	0.0003329	0.023636
6	1.86e-7	0.0016294	0.221598
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0.0108849	95.3517244	16686.551770
10	0	0	0
13	0	0	0
14	6.01e-8	0.0005265	0.102141
15	0	0	0
16	0	0	0
18	0	0	0
19	0.02198609	192.5981484	34860.264860
20	0	0	0

در این قسمت نیز به منظور انجام مطالعات قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال دو حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول سیستم پایه IEEEERTS بدون اضافه شدن واحد جدید بوده و در حالت دوم یک نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیار مخروطی دریا با ظرفیت ۲۰ مگاوات به باس ۱۹ این سیستم اضافه می‌گردد. در این دو حالت شاخص‌های قابلیت اطمینان احتمال قطعی بار، متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تأمین نشده در هر نقطه بار با در نظر گرفتن ۲ خرابی در واحدهای تولید، ۲ خرابی در خطوط انتقال و همزمان ۲ خرابی در واحدهای تولید و خطوط انتقال محاسبه شده و به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است. همان‌گونه که در این جداول مشخص است شاخص‌های قابلیت اطمینان باس ۱۹ سیستم IEEEERTS پایه مطلوب نمی‌باشد که با اضافه شدن نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیار مخروطی دریا به این باس، این شاخص‌ها بهبود پیدا می‌کند.

جدول (۷): احتمال قطع بار در نقاط بار برای سیستم IEEEERTS پایه با اضافه شدن نیروگاه امواج به باس ۱۹

Load points	Loss of load probability	Loss of load expectation (hrs/yr)	Expected energy not supplied (MWh/yr)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	2.34E-07	0.00204984	0.3689712
4	4.68E-08	0.000409968	0.030337632
5	3.76E-08	0.000329376	0.023385696
6	1.86E-07	0.00162936	0.22159296
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0.009332	81.74832	14305.956
10	0	0	0
13	0	0	0
14	6.01E-08	0.000526476	0.102136344
15	0	0	0
16	0	0	0
18	0	0	0
19	0.021982	192.56232	34853.77992
20	0	0	0

۵- نتیجه‌گیری تحقیق

در این تحقیق ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال در شرایطی که نیروگاه‌های امواج توان الکتریکی قابل توجهی را تولید می‌کنند مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا اصول تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی و انواع مختلف نیروگاه‌های امواج معرفی و در ادامه مفهوم قابلیت اطمینان سیستم قدرت به عنوان یکی از مطالعات مهم در شبکه‌های قدرت امروزی تشریح گردید. سپس تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال با حضور نیروگاه‌های امواج معرفی و چگونگی تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های امواج بیان گردید. به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های امواج هم خرابی المان‌های تشکیل‌دهنده و هم تغییرات توان خروجی این نیروگاه‌ها به دلیل تغییرات ارتفاع و دوره تناوب موج در نظر گرفته شد. با لحاظ نمودن این دو جنبه نیروگاه‌های امواج مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور شیار مخروطی دریا با یک مدل چندحالتی نمایش داده می‌شوند. به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال از آنالیز پیشامدها و به منظور در نظر گرفتن نیروگاه‌های امواج در این مطالعات از مدل احتمال شرطی استفاده شد. به منظور بررسی روش پیشنهادی ابتدا مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه امواج ۲۰ مگاواتی مبتنی بر ژنراتور شیار مخروطی دریا بدست آمد و سپس از مدل به دست آمده به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مرکب تست RBTS و IEEE-RTS استفاده شد و شاخص‌های احتمال قطع بار، زمان متوسط قطع بار و میزان متوسط انرژی تأمین نشده در نقاط بار این دو سیستم بدست آمد. بررسی نتایج عددی نشان می‌دهد که در یک سیستم مرکب تولید و انتقال که شامل واحدهای تولید و خطوط انتقال می‌باشند در برخی نقاط قابلیت اطمینان ضعیف می‌باشد که برای سیستم تست RBTS نقطه بار سوم و برای سیستم مرکب IEEE-RTS نقطه بار نوزدهم از

جمله این نقاط می‌باشند. بنابراین زمانی که برنامه‌ریز سیستم قدرت بخواهد تقویتی در سیستم خود ایجاد نماید بهتر است از این نقاط شروع کند. بر همین اساس فرض شد نیروگاه امواج ۲۰ مگاواتی به باس سوم سیستم RBTS و همچنین باس نوزدهم سیستم IEEE-RTS اضافه شود. با اضافه شدن این نیروگاه شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مرکب به ویژه در باس سوم سیستم RBTS و باس نوزدهم سیستم IEEE-RTS بهبود پیدا کرد. البته باید به این نکته اشاره نمود که تأثیر بهبود قابلیت اطمینان شبکه قدرت با اضافه شدن نیروگاه‌های امواج نسبت به نیروگاه‌های متداول سنتی با توان ثابت کمتر خواهد بود؛ چرا که نیروگاه‌های امواج به دلیل تغییرات ارتفاع و دوره تناوب موج، توان خروجی متغیر و در بیشتر مواقع کمتر از توان نامی خود را به شبکه تحویل می‌دهند اما نیروگاه‌های متداول سنتی تنها در صورت خراب شدن توان صفر خواهند داشت اما در صورت سالم بودن همواره توان نامی را تولید خواهند نمود.

References

مراجع

- [1] L. Duckers, "Water power-wave, tidal and low-head hydro technologies", *Power engineering journal*, vol. 9, no. 4, pp. 164-172, 1995.
- [2] K. T. Chau, W. L. Li, C. H. T. Lee, "Challenges and opportunities of electric machines for renewable energy", *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 42, pp. 45-74, 2012.
- [3] E. R. Engen, Transmission solutions for connecting offshore power plants to the onshore grid, *MS thesis*, Institutt for elkraftteknikk, 2009.
- [4] P. Goswami, S. P. Deshmukh, N. P. Marg, "Ocean Energy for Electricity Generation and Its Potential In India", *Invertis Journal of Renewable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 231-238, 2015.
- [5] L. Szabo, C. Oprea, C. Festila, É. Dulf, "Study on a wave energy based power system", *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*. IEEE, 2008.
- [6] Kok, Nicolaas Johannes. *Wave and tidal power review*. Diss. University of Cape Town, 1978.
- [7] D. Vicinanza, L. Margheritini, J. P. Kofoed, M. Buccino, "The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments", *Energies*, vol. 5, no. 2, pp. 193-226, 2012.
- [8] L. Crom, H. Cabrera Bermejo, Arthur Pecher, E. Brito Azevedo, F.V. Reis, "Incident wave climate at the OWC Pico plant: Validation of a feed-forward based propagation method (ANN) and a numerical simulation (SWAN) with measured data", *The 9th European Wave and Tidal Energy Conference: EWTEC 2011*. University of Southampton, 2011.
- [9] P. Arthur, J. P. Kofoed, T. Larsen, "Design specifications for the Hanstholm WEPTOS wave energy converter", *Energies*, vol. 5, no. 4, pp. 1001-1017, 2012.
- [10] L. Huang, M. Hu, Z. Chen, H. Yu, C. Liu, "Research on a Direct-Drive Wave Energy Converter Using an Outer-PM Linear Tubular Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, 2017.
- [11] J. Hayward, O. Peter, "The potential of wave energy", *CSIRO.[Online]*. Available: <http://www.Csiro.Au/files/files/p10e6.Pdf>, accessed on, vol. 11, no. 3, 2011.
- [12] N. J. Baker, M. A. Mueller, "Direct drive wave energy converters", *Rev. Energ. Ren. Power Engineering*, vol. 1, pp. 1-7, 2001.
- [13] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, S. Bazyari, "Reliability modeling of wave energy converters based on pelamis technology", *Electric Power Systems Research*, vol. 227, 109977, 2024.
- [14] A. Ghaedi, "Determining the appropriate mixture of renewable energy sources in order to reduce uncertainty", *Systems Smartening and Data Processing*, vol. 1, no. 1, pp. 24-37, 2023.
- [15] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, "Reliability modeling of different wave energy conversion technologies", *Electrical Engineering*, pp. 1-25, 2024.