

Analysis of the impact of hydrogen storage on power system reliability**Milad Barzin, *M.Sc*****Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran**
miladbarzin1371@gmail.com**Received:** 04 January 2025**Revised:** 09 April 2025**Accepted:** 10 April 2025**Abstract:**

In today's power systems, renewable energy sources such as wind farms, solar power plants, wave energy, tidal energy, and others have experienced significant growth. The share of these energies in meeting the grid's required load is increasing day by day. On the other hand, the power generated by renewable power plants is constantly changing over time, making it impossible to predict their output with 100% certainty. The power generated by wind farms depends on wind speed, solar power plants on solar radiation intensity, tidal power plants on tidal height or current velocity, and wave power plants on wave height and period. Since these quantities vary over time, the power generated by these plants also fluctuates. Therefore, the power output of renewable power plants, unlike traditional power plants, is not controllable and changes over time. These fluctuations in the output power of these plants affect various aspects of modern power systems, including reliability. Nowadays, reliability studies in power systems have become crucial to prevent power outages. This is because for electricity consumers who demand a high level of social welfare, power outages, even for a short duration, are unacceptable. Based on this, this paper proposes the use of a storage system in the power grid, comprising a water electrolyzer, a hydrogen storage tank, and a fuel cell device. When the power generated by renewable energy sources is high and the grid load is low, the surplus power from renewable sources is used by the water electrolyzer to decompose water into hydrogen and oxygen. The produced hydrogen is then stored in the hydrogen storage tank. When the grid load is high or the power generated by renewable energy sources is low, the hydrogen stored in the tank is fed into the fuel cell device to produce electrical power and compensate for the power deficit. In this paper, the impact of the electrolyzer-hydrogen storage tank-fuel cell system on power system reliability is investigated. To determine the reliability indices of the power system with the presence of hydrogen storage, the load duration curve is modified. To examine this impact, simulations are also performed in the MATLAB software environment. The simulation results demonstrate that hydrogen storage improves reliability indices.

Keywords: Reliability, electrolyze system, hydrogen tank, fuel cell, energy storage system.**Corresponding Author:** Milad Barzin**Corresponding Author Address:** Department of Electrical Engineering- Kazerun Branch -Islamic Azad University- Kazerun- Iran.

بررسی تأثیر ذخیره‌ساز هیدروژن بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت

میلاد برزین، کارشناسی ارشد

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

چکیده: در سیستم‌های قدرت امروزی منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، امواج، جزرومدی و ... رشد زیادی داشته‌اند و سهم این انرژی‌ها در تامین بار مورد نیاز شبکه روز به روز در حال افزایش است. از طرف دیگر توان تولیدی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در طول زمان در حال تغییر است، به گونه‌ای که نمی‌توان توان خروجی آن‌ها را به صورت ۱۰۰ درصد پیش‌بینی نمود. توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به سرعت باد، توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی به شدت تابش خورشید، توان تولیدی نیروگاه‌های جزرومدی به ارتفاع جزرومد یا سرعت جریان‌های جزرومدی و توان تولیدی نیروگاه‌های امواج به ارتفاع و دوره تناوب امواج وابسته است و از آنجا که این کمیت‌ها در طول زمان تغییر می‌کنند، توان تولیدی این نیروگاه‌ها نیز متغیر است. بنابراین توان تولیدی نیروگاه‌های تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های سنتی قابل کنترل نبوده و در طول زمان تغییر می‌کند. تغییرات توان خروجی این نیروگاه‌ها بر مسائل مختلف سیستم‌های قدرت امروزی از جمله قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارد. امروزه مطالعات قابلیت اطمینان در سیستم قدرت به منظور جلوگیری از قطعی برق اهمیت زیادی پیدا کرده است؛ چرا که برای مشترکین برق که سطح رفاه اجتماعی بالایی را طلب می‌کنند، قطعی برق حتی برای مدت زمان کوتاه قابل تحمل نیست. بر همین اساس در این مقاله پیشنهاد شده است که در شبکه قدرت از سیستم ذخیره‌ساز شامل دستگاه الکترولیز آب، تانک ذخیره هیدروژن و دستگاه پیل سوختی استفاده گردد. در زمانی که توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر زیاد است و بار شبکه نیز کم می‌باشد مازاد توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر در دستگاه الکترولیز آب صرف تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن می‌گردد. هیدروژن تولیدی در تانک ذخیره هیدروژن ذخیره می‌گردد. در زمانی که بار شبکه زیاد است و یا توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر کم است، هیدروژن ذخیره شده در تانک ذخیره هیدروژن وارد دستگاه پیل سوختی شده و توان الکتریکی تولید می‌کند تا کمبود توان را جبران نماید. در این مقاله تأثیر سیستم شامل الکترولیز-تانک ذخیره هیدروژن-پیل سوختی بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت بررسی می‌گردد. به منظور تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور ذخیره‌ساز هیدروژن، منحنی تداوم بار اصلاح می‌گردد. به منظور بررسی این تأثیر، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب نیز انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد ذخیره‌ساز هیدروژن سبب بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌گردد.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، دستگاه الکترولیز آب، تانک ذخیره هیدروژن، دستگاه پیل سوختی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی

نام نویسنده‌ی مسئول: میلاد برزین

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

۱- مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

در سال‌های اخیر استفاده از هیدروژن به منظور مصارف مختلف افزایش یافته است. در سال ۲۰۲۳ میزان استفاده از هیدروژن حدود ۱۰۰ میلیون تن بوده است که پیش‌بینی می‌گردد تا سال ۲۰۵۰ این میزان به حدود ۳۵۰ میلیون تن برسد. یکی از موارد استفاده از هیدروژن در خودروهای هیدروژنی می‌باشد. با توجه به اینکه خودروهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی آلودگی زیست محیطی را به دنبال دارند، روند استفاده از این خودروها محدودتر شده و خودروهای برقی و هیدروژنی که آلودگی محیط زیست را به دنبال ندارند در حال جایگزین شدن به جای این خودروها می‌باشند. انرژی الکتریکی در دستگاه الکترولیز آب مصرف شده و آب را به اکسیژن و هیدروژن تجزیه می‌نماید. هیدروژن تولیدی در مخازن مخصوص ذخیره‌سازی شده و سپس می‌تواند در دستگاه پیل سوختی استفاده شده و انرژی الکتریکی تولید کنند. البته می‌توان هیدروژن را در خودروهای هیدروژنی که مجهز به پیل سوختی هستند استفاده نمود و توان الکتریکی جهت درایو موتورهای الکتریکی این خودروها برای چرخاندن چرخ خودرو را تامین نمود. در سال‌های اخیر منابع انرژی تجدیدپذیر توسعه زیادی یافته‌اند. دلیل آن این است که این منابع انرژی آلودگی محیط زیست را به دنبال ندارند و از طرف دیگر هزینه بهره‌برداری آن‌ها به دلیل اینکه به سوخت نیاز ندارند بسیار کم می‌باشد. از بین منابع مختلف تجدیدپذیر، نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک رشد زیادی داشته‌اند. امروزه هیدروژن به عنوان یک سوخت پاک مطرح می‌باشد و دلیل توسعه آن نیز همین پاک و دوستدار محیط زیست بودن آن است. سوخت هیدروژن بر خلاف سایر سوخت‌ها به مانند سوخت‌های فسیلی که گازهای گلخانه‌ای تولید می‌کنند و آلودگی محیط زیست را به دنبال دارند پاک بوده و سبب آلودگی محیط زیست نمی‌شود. به علاوه در روش‌های تولید سوخت هیدروژن نیز آلودگی ایجاد نمی‌گردد؛ چرا که می‌توان از منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های بادی که در دریا نصب شده‌اند استفاده نمود و با استفاده از الکترولیز آب هیدروژن تولید کرد. بنابراین به دلیل اینکه تولید هیدروژن از روش‌های پاک صورت می‌گیرد و سوخت هیدروژن نیز آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به مانند گازهای دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن را به دنبال ندارد در آینده سوخت هیدروژن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و انرژی هیدروژن یکی از انرژی‌های مطرح در آینده خواهد بود. منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر به مانند زیست توده، توربین‌های بادی، پنل‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های زمین گرمایی و آبی از جمله منابع تولید برق در آینده هستند. برق تولیدی این نیروگاه‌ها می‌تواند از طریق شبکه انتقال به محل بارها منتقل شده و مورد استفاده قرار بگیرد. در مواقعی که توان الکتریکی تولیدی این نیروگاه‌ها از بار مورد نیاز بیشتر است می‌توان مازاد توان را در باتری‌های ذخیره انرژی، ذخیره نمود و در مواقعی که مورد نیاز است از طریق دشارژ نمودن باتری‌ها استفاده کرد. همچنین می‌توان در مواقعی که توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر از بار مورد نیاز سیستم بیشتر است، مازاد توان را در دستگاه‌های الکترولیز آب استفاده نمود و گاز هیدروژن تولید کرد. گاز هیدروژن تولیدی می‌تواند جهت استفاده در خودروهای هیدروژنی مورد استفاده قرار بگیرد و یا اینکه از طریق ترکیب با گاز دی‌اکسیدکربن، گاز طبیعی تولید کند. گاز طبیعی تولید شده می‌تواند در خودروهای با گاز طبیعی مورد استفاده قرار بگیرد و یا اینکه جهت گرمایش ساختمان استفاده شود. به علاوه این گاز می‌تواند در توربین‌های با گاز طبیعی استفاده شده و برق تولید کند. با توجه به موارد بیان شده به این نتیجه می‌رسیم که هیدروژن به عنوان یکی از سوخت‌های پاک در آینده مطرح بوده و بنابراین باید مورد مطالعه قرار بگیرد. به علاوه سیستم الکترولیز - تانک ذخیره هیدروژن - پیل سوختی به عنوان یکی از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. بر همین اساس اهمیت دارد که تاثیر این سیستم ذخیره بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت بررسی شود.

۱-۲- مرور سوابق مربوط

با توجه به اهمیت موضوع، در این قسمت، تحقیقاتی که در زمینه منابع انرژی تجدیدپذیر، دستگاه الکترولیز آب، تانک ذخیره هیدروژن، دستگاه پیل سوختی و قابلیت اطمینان مطالعاتی را صورت داده‌اند مرور می‌شوند. در [۱] یک مجموعه شامل سیستم فتوولتائیک، دستگاه الکترولیز آب و سیستم پیل سوختی به منظور تولید هیدروژن و تولید برق توسعه یافته است. در [۲] ارزیابی عددی یک سیستم انرژی هیبرید بر اساس دستگاه الکترولیز آب اکسید جامد، انرژی خورشیدی و دستگاه پیل

سوختی کربنات ذوب شده به منظور تولید انرژی الکتریکی و همچنین سوخت هیدروژن با در نظر گرفتن امکان ذخیره برق صورت گرفته است. در [۳] مطالعه انرژی تولیدی و ارزیابی اقتصادی سیستم هیبرید متشکل از پیل سوختی با غشای کترولیتی پلیمر و سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک به منظور تولید هیدروژن و انرژی الکتریکی صورت گرفته است. مقاله [۴] طراحی یک سیستم هیبرید تجدیدپذیر شامل پنل فتوولتائیک، دستگاه الکترولیز آب، سیستم پیل سوختی با غشای کترولیتی پلیمر که از گاز هیدروژن استفاده می‌کند را انجام داده است. در [۵] کنترل هماهنگ سیستم ذخیره‌ساز انرژی هیبرید تانک هیدروژن در ریزشبه‌های شامل دستگاه پیل سوختی، دستگاه الکترولیز آب، سیستم فتوولتائیک و باتری انجام شده است. مقاله [۶] طراحی بهینه یک سیستم تولید توان الکتریکی هیبرید مبتنی بر اجتماع پیل سوختی با غشای کترولیتی پلیمری و دستگاه الکترولیز آب با غشای کترولیتی پلیمری را در یک ریزشبه مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر انجام داده است. در [۷] آنالیز فنی - اقتصادی یک سیستم متشکل از سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و پیل سوختی جهت استفاده در ایستگاه شارژ خودرو برقی انجام شده است. در [۸] آنالیز الکتریکی یک سیستم هیبرید شامل سیستم فتوولتائیک، تانک ذخیره هیدروژن و سیستم پیل سوختی در دینزلی ترکیه انجام شده است. در [۹] مروری بر روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان و تعیین طول عمر پیل‌های سوختی اکسید جامد صورت گرفته است. در این تحقیق هم پیل‌های سوختی مقیاس بزرگ و هم پیل‌های سوختی با توان کمتر مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس تست‌های با دوره زمانی کوتاه طول عمر این تجهیزات پیش‌بینی شده است. در [۱۰] چگونگی مجتمع کردن، مطالعه دوام و همچنین قابلیت اطمینان پیل‌های سوختی انجام شده و چالش‌ها و راه‌حل‌های مربوطه بررسی شده است. در این مقاله سه پنجره عملیاتی برای مراحل مختلف شامل تجهیزات، سلول‌های تکی و مجموعه مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله [۱۱] ارزیابی قابلیت اطمینان دینامیکی سیستم‌های پیل سوختی را انجام داده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان دینامیکی برای پیل‌های سوختی با غشای کترولیتی پلیمری معرفی شده است. این مدل زیرمدل‌های فیزیکی و آماری را ترکیب نموده است. در [۱۲] مدلسازی و ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌های پیل سوختی متصل به شبکه انجام شده است. در این مقاله تغییرات فصلی آب و هوا در نظر گرفته شده و بر اساس آن شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه قدرت با حضور نیروگاه‌های پیل سوختی محاسبه شده است. در [۱۳] مدلسازی و تحلیل نیروگاه‌های پیل سوختی در شرایط کارکرد جدا از شبکه قدرت بررسی شده است. در این مقاله یک روش فضای حالت به منظور محاسبه قابلیت اطمینان نیروگاه پیل سوختی ایزوله بر اساس مدل مارکوف مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۴] آنالیز قابلیت اطمینان دستگاه الکترولیز با غشای کترولیتی پلیمری صورت گرفته است. در این مقاله از معادلات ساختاری بایاسین به منظور بررسی قابلیت اطمینان این سیستم‌ها بر اساس سناریوهای خرابی مختلف استفاده شده است. در [۱۵] روش‌های مختلف تولید هیدروژن از دستگاه الکترولیز آب بیان شده و چگونگی تحلیل قابلیت اطمینان این سیستم‌ها مطالعه شده است. در این مقاله بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان صورت گرفته روش‌های مختلف بهبود قابلیت اطمینان این سیستم‌ها بیان شده و عدم قطعیت‌های مختلف نیز بررسی شده است. در [۱۶] تاثیر استفاده از ذخیره‌ساز انرژی باتری بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله علاوه بر باتری، تاثیر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، مولد همزمان برق و حرارت و برنامه پاسخگویی بار بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مطالعه شده است. در [۱۷] تاثیر استفاده از باتری‌های وانادیوم ریداکس بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع جریان‌ی بررسی شده است. در این مقاله بیان شده است که به دلیل تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریان‌ی در طول زمان تغییر می‌کند و استفاده از باتری ذخیره انرژی سبب کاهش نوسانات توان و بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌گردد. در [۱۸] برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ریزشبه‌های جزیره‌ای با در نظر گرفتن اثر پاسخگویی بار و خودروهای الکتریکی انجام شده است. در این مقاله خودروهای الکتریکی دارای قابلیت اتصال به شبکه هستند و می‌توانند به صورت یک ذخیره‌ساز انرژی عمل کنند.

۱-۳- شکاف تحقیقاتی و نوآوری‌های مقاله

با توجه به مطالعه مقالات بیان شده در این بخش به این نتیجه می‌رسیم که تاکنون کار خاصی بر روی تعیین قابلیت اطمینان سیستم قدرت زمانی که سیستم ذخیره‌ساز انرژی متشکل از دستگاه الکترولیز آب - تانک ذخیره هیدروژن و دستگاه پیل

سوختی به آن اضافه شده باشد انجام نشده است. بنابراین نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

- ارائه تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز شامل دستگاه الکترولیز، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن و پیل سوختی
 - بررسی تاثیر سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت
- لذا این مقاله به منظور بررسی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت تعریف شده است. بر همین اساس در بخش‌های بعد ابتدا سیستم متشکل از دستگاه الکترولیز آب، تانک ذخیره هیدروژن و دستگاه پیل سوختی تشریح می‌گردد و سپس به کمک یک روش مناسب تاثیر این سیستم بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت بررسی می‌گردد. در پایان نیز نتایج عددی مربوط به این مطالعه ارائه می‌گردد.

۲- سیستم الکترولیز - تانک ذخیره هیدروژن - پیل سوختی

دستگاه الکترولیز آب از انرژی الکتریکی استفاده کرده و آب را به اکسیژن و هیدروژن تجزیه می‌نماید. هیدروژن به دست آمده نیز در مخازن مخصوص ذخیره شده و می‌تواند به عنوان سوخت در ساختمان‌ها و یا خودروهای هیدروژنی مورد استفاده قرار گیرد. الکترولیز یک فرایند الکتروشیمیایی است که از انرژی الکتریکی استفاده نموده و آب را به عناصر تشکیل دهنده آن یعنی هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌نماید. این فرایند در یک دستگاه موسوم به دستگاه الکترولیز آب انجام می‌شود که این دستگاه، دارای دو الکترود به نام‌های آند و کاتد بوده که توسط یک الکترولیت از هم جدا می‌شوند. زمانی که یک جریان الکتریکی از آب عبور می‌کند، هیدروژن در سمت کاتد و اکسیژن در سمت آند تشکیل می‌شوند. تاکنون سه تکنولوژی برای الکترولیز آب معرفی شده است که عبارتند از الکترولیز آب آکالین (AWE)، الکترولیز آب با غشای تبادل پروتون (PEM) و الکترولیز آب اکسید جامد (SOE).

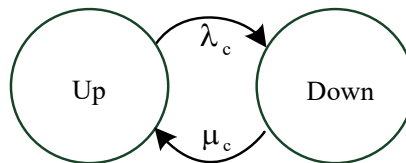
به طور کلی تاکنون سه روش ذخیره‌سازی هیدروژن معرفی شده است که می‌تواند به منظور تغذیه خودروهای هیدروژنی نیز استفاده شود. این روش‌ها عبارتند از ذخیره‌سازی هیدروژن مایع، ذخیره‌سازی گاز فشرده و ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد یا همان روش هیدریدهای فلزی. سومین تجهیز از سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی، پیل سوختی می‌باشد که می‌تواند با ترکیب هیدروژن و اکسیژن (هوا)، توان الکتریکی تولید کند. بسیاری از افراد معتقدند پیل سوختی راه‌حلی برای قرن بیست و یکم است که می‌تواند توان الکتریکی و حرارت مورد نیاز بسیاری از بارها را به صورت پاک و با بازدهی خوب تامین نماید. پیل‌های سوختی تجهیزات الکتروشیمیایی هستند که از هیدروژن یا سوخت‌هایی که هیدروژنی غنی دارند به همراه اکسیژن هوا استفاده کرده و انرژی الکتریکی و گرما ایجاد می‌کنند. انواع مختلف پیل‌های سوختی عبارتند از: پیل‌های سوختی غشای الکترولیتی پلیمری با دمای کم و زیاد، پیل سوختی متانول مستقیم، پیل سوختی آکالین، پیل سوختی اسید فسفریک، پیل سوختی کربنات مذاب، پیل سوختی سرامیک پروتونی و پیل سوختی اکسید جامد.

۳- قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن

قابلیت اطمینان سیستم قدرت میزان توانایی این سیستم در تأمین برق مشترکین به صورت پیوسته همراه با کیفیت مطلوب و رعایت استانداردهای مربوطه می‌باشد. 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 شاخص‌های 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 مونت کارلو 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

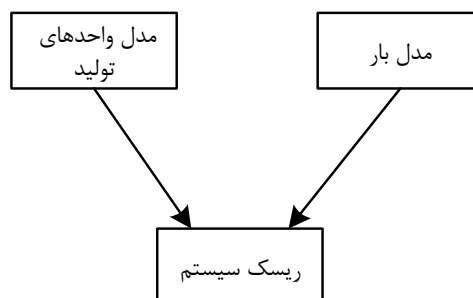
مدل قابلیت اطمینان ارائه شود. برای به دست آوردن این مدل مراحل زیر طی می‌گردد: شناخت کل سیستم و چگونگی عملکرد آن، تعیین اجزای سیستم و مشخص نمودن زیرسیستم‌های مربوطه، چگونگی خراب شدن هر کدام از اجزا و به دست آوردن مدل مارکوف مربوط به آن‌ها، تأثیر خرابی هر کدام از اجزا بر عملکرد کل سیستم، تعیین مدل قابلیت 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. 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.

$$P_c^{UP} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, P_c^{DOWN} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} \quad (1)$$



شکل (۱): مدل مارکوف دو حالتی

در این قسمت تکنیک ارزیابی کفایت سیستم قدرت در سطح اول (سیستم تولید) به روش تحلیلی و نحوه محاسبه شاخص‌های مهم این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت در این سطح کلیه واحدهای تولید و همچنین کلیه بارهای مصرفی به یک باس مشترک وصل شده و از تأثیر سیستم انتقال صرف‌نظر می‌گردد. در ارزیابی تحلیلی قابلیت اطمینان در سطح اول، ظرفیت‌ها و احتمالات مربوط به واحدهای تولید با مدل قابلیت اطمینان دو حالتی و یا چند حالتی در یک جدول که جدول احتمال خروج ظرفیت‌ها* (COPT) نامیده می‌شود جمع‌آوری شده و از ترکیب این مدل تولید و مدل بار، به مانند شکل ۲ ریسک سیستم و شاخص‌های مربوطه به دست می‌آید.



شکل (۲): ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح اول

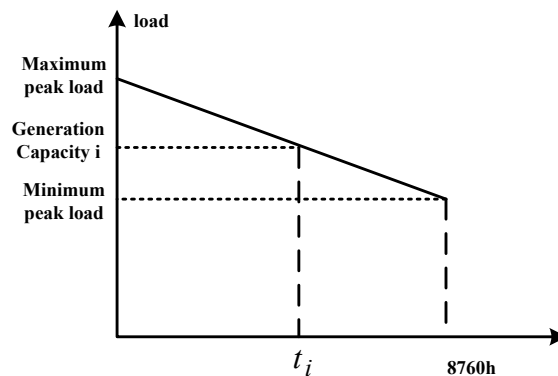
در مطالعه کفایت سیستم قدرت شاخص‌های قابلیت اطمینانی به مانند مقدار متوسط بار قطع شده (LOLE)، متوسط انرژی تأمین نشده (EENS)، میزان بار قابل تغذیه (PLCC) و قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه (IPLCC) محاسبه می‌شوند.

* Capacity Outage Probability Table

اگر بار به صورت منحنی تداوم (LDC) به صورت یک خط مستقیم از ۱۰۰ درصد تا درصد مشخصی از ماکزیمم پیک بار سالانه مدلسازی شود؛ برای محاسبه شاخص‌های بیان شده به صورت زیر عمل می‌شود:

- **متوسط میزان قطع بار:** به ازای هر کدام از ظرفیت‌های جدول COPT میزان تولید با بار مقایسه می‌شود (شکل ۳). مدت زمانی که به ازای ظرفیت i ام سیستم قادر نیست بار را تأمین کند برابر با t_i می‌باشد و میزان متوسط بار قطع شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

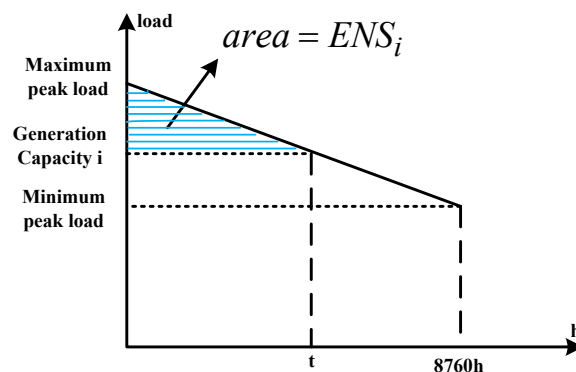
$$LOLE = \sum_{i=1}^n t \times P_i \text{ hours / year} \quad (2)$$



شکل (۳): نحوه محاسبه شاخص میزان متوسط بار قطع شده

- **میزان متوسط انرژی تأمین نشده:** در محاسبه شاخص میزان قطع بار در صورتی که میزان تولید از میزان بار کمتر باشد، چه همه بار قطع شود و چه بخشی از آن مدت زمان مربوطه به حساب آورده می‌شود. به منظور تمایز بین موارد ذکر شده از شاخصی مبتنی بر انرژی استفاده می‌شود. برای محاسبه شاخص میزان انرژی قطع شده به ازای هر کدام از ظرفیت‌های موجود در جدول COPT، میزان انرژی قطع شده به صورت نشان داده شده در شکل ۴ به دست آمده و سپس مجموع وزن داده شده این انرژی‌ها در احتمال مربوطه شاخص متوسط را مطابق رابطه زیر نتیجه می‌دهد.

$$EENS = \sum_{i=1}^n ENS_i \times P_i \quad (3)$$



شکل (۴): نحوه محاسبه میزان انرژی تغذیه نشده

در این بخش مدل قابلیت اطمینان سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی به دست آورده شده و سپس تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور این سیستم ذخیره‌ساز بیان می‌شود. در یک سیستم قدرت به ویژه در شرایطی

که در آن نیروگاه‌های تجدیدپذیر وجود داشته باشند زمانی که میزان توان تولیدی واحدهای تولید از میزان بار مورد نیاز شبکه بیشتر باشد، توان الکتریکی مازاد در سیستم الکترولیز آب صرف تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن می‌گردد. هیدروژن تولیدی در مخازن مخصوص ذخیره شده و در مواقعی که میزان توان تولیدی سیستم قدرت از توان مورد نیاز بار کمتر باشد وارید سیستم پیل سوختی می‌گردد. در این سیستم توان الکتریکی و آب تولید می‌گردد. توان الکتریکی تولیدی کمبود توان مورد نیاز بار را جبران می‌کند. برای به دست آوردن مدل قابلیت اطمینان این سیستم باید تاثیر خرابی هر کدام از تجهیزات شامل الکترولیز، مخزن ذخیره هیدروژن و پیل سوختی بر عملکرد سیستم ذخیره‌ساز بررسی گردد. با خراب شدن هر کدام از تجهیزات شامل دستگاه الکترولیز، تانک ذخیره هیدروژن و دستگاه پیل سوختی، عملکرد سیستم ذخیره‌ساز دچار مشکل شده و امکان تولید توان الکتریکی به منظور جبران کمبود توان وجود ندارد. در صورتی که دستگاه الکترولیز خراب شود، امکان تولید هیدروژن وجود ندارد. در صورتی که مخزن ذخیره هیدروژن خراب شود، نمی‌توان هیدروژن تولیدی را ذخیره نمود و برای استفاده در پیل سوختی به کار برد. همچنین در صورت خراب شدن پیل سوختی امکان تولید توان الکتریکی وجود ندارد. بنابراین از نظر قابلیت اطمینان این سه تجهیز به صورت نشان داده شده در شکل ۵ با هم سری هستند، چرا که در صورت خراب شدن هر کدام از آن‌ها امکان انجام وظیفه و کارکرد سیستم ذخیره‌ساز وجود ندارد. با توجه به اینکه در این قسمت هدف تعیین یک مدل قابلیت اطمینان برای سیستم ذخیره‌ساز متشکل از الکترولیز، تانک ذخیره هیدروژن و پیل سوختی بر اساس خرابی اجزای تشکیل دهنده است این مدل یک مدل مارکوف دوحالت می‌باشد که مقدار نرخ خرابی و تعمیر آن از روابط زیر بدست می‌آید. در این روابط λ_i نرخ خرابی المان λ_m ، λ_c نرخ خرابی معادل کل سیستم، r_i زمان تعمیر المان λ_m ، r_c زمان تعمیر معادل کل سیستم، U_i عدم دسترس پذیری المان λ_m و U_c عدم دسترس پذیری معادل کل سیستم می‌باشد.

$$\lambda_c = \sum \lambda_i, U_c = \sum U_i, r_c = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_i} \quad (4)$$



1- electrolyzer device
2- hydrogen storage device
3- fuel cell unit

شکل (۵): سری بودن تجهیزات در مدل قابلیت اطمینان

در این بخش تأثیر عملکرد سیستم ذخیره‌ساز متشکل از الکترولیز، مخزن ذخیره هیدروژن و پیل سوختی بر مدل قابلیت اطمینان بدست آمده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در یک شبکه قدرت در زمان کم‌باری و در زمانی که میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها از بار مورد نیاز بیشتر باشد، مازاد توان الکتریکی در سیستم الکترولیز مصرف شده و هیدروژن تولید و در تانک ذخیره می‌شود. در مواقع نیاز (بار زیاد و یا به منظور کاهش هزینه) هیدروژن ذخیره شده در سیستم پیل سوختی مصرف شده و برق تولید می‌کند. مدل کامل قابلیت اطمینان بر اساس اصول کارکرد سیستم ذخیره‌ساز به صورت زیر تعیین می‌شود.

تأثیر حالت با عملکرد الکترولیز: زمانی دستگاه الکترولیز وارد مدار می‌شود که میزان بار کم و میزان تولید زیاد و بیشتر از مقدار بار مورد نیاز باشد. بنابراین اگر تولید کمتر از بار باشد سیستم الکترولیز وارد مدار نمی‌شود؛ چرا که تأمین بار و جلوگیری از قطع بار برای شرکت برق بسیار با اهمیت می‌باشد. بنابراین فرض می‌گردد که مدت زمان کم‌باری، میزان بار در زمان کم-باری، میزان تولید نیروگاه‌های دیگر در شبکه و ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز به گونه‌ای است که حتماً در طول شبانه‌روز سیستم الکترولیز می‌تواند در مدت زمان کم‌باری وارد عمل شده و تا ظرفیت کامل هیدروژن تولید کند. البته این فرض، فرض معقولی است؛ چرا که معمولاً سیستم‌های الکترولیز در طول شب که بار شبکه بسیار کم است وارد مدار شده و تولید هیدروژن را انجام می‌دهند. در صورتی که این فرض برقرار نباشد در حالت عملکرد الکترولیز، هیدروژن به اندازه ظرفیت کامل تولید و ذخیره نمی‌گردد؛ و لذا نمی‌توان انتظار داشت که در مواقع عملکرد سیستم ذخیره‌ساز به صورت پیل سوختی انرژی کامل را به شبکه

بدهد. لذا دو اتفاق ممکن است بیفتد: یا پیل سوختی در مدت زمان تعیین شده کار می کند اما نه با ظرفیت نامی و یا این که پیل سوختی توان نامی را تولید می کند اما نه برای مدت زمان تعیین شده بلکه در مدت زمان کمتر.

ظرفیت مخزن ذخیره هیدروژن: ظرفیت مخزن ذخیره هیدروژن نیز بر عملکرد سیستم ذخیره ساز و در نتیجه مدل قابلیت اطمینان تأثیر دارد. در صورتی که ظرفیت مخزن ذخیره هیدروژن به اندازه کافی زیاد باشد مزایای زیر برای سیستم ذخیره ساز وجود دارد:

- دستگاه الکترولیز در مواقع کم باری می تواند در مدت زمان بیشتری کار کرده و هیدروژن بیشتری تولید و در مخزن، ذخیره نماید. بنابراین در مواقع کمبود توان و پرباری سیستم پیل سوختی مدت زمان طولانی تری را می تواند با ظرفیت نامی توان به شبکه تحویل دهد.
- برخی روزها هیدروژن به اندازه کافی در مخزن وجود دارد و نیاز نیست سیستم الکترولیز کار کند. حتی می توان هیدروژن مازاد را به عنوان سوخت فروخت و از این راه درآمدزایی نمود.
- با توجه به ظرفیت هیدروژن زیاد می توان در شبکه چندین سیستم پیل سوختی اضافه داشت و توان بیشتری را در حالت پرباری به شبکه تحویل داد.

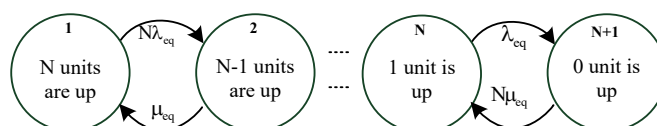
اما اگر مخزن ذخیره هیدروژن به اندازه کافی بزرگ نباشد میزان هیدروژن ذخیره شده نیز محدود بوده و مدت زمان کارکرد سیستم الکترولیز برای ذخیره نمودن این مقدار هیدروژن، کم می شود. لذا در حالت پرباری نیز مدت زمان و یا میزان توان تولیدی پیل سوختی ممکن است کاهش یابد.

بازده سیستم: با توجه به وجود تلفات شامل تلفات الکتریکی، شیمیایی، و همچنین تلفات هیدروژن، توان و یا انرژی تولیدی در حالت عملکرد پیل سوختی کمتر از توان و یا انرژی مصرفی به منظور الکترولیز نمودن آب می باشد. چرا که دستگاه الکترولیز، مخزن ذخیره هیدروژن، پیل سوختی و سایر تجهیزات دارای یک راندمان کمتر از ۱۰۰ درصد بوده و راندمان کل از حاصل ضرب این راندمان ها بدست می آید که مسلماً کوچکتر از ۱ می باشد. معمولاً راندمان دستگاه الکترولیز آب بسته به نوع آن، حدود ۵۰ تا ۹۵ درصد، راندمان تانک ذخیره هیدروژن بسته به نوع ذخیره سازی هیدروژن، ۷۷ تا ۹۴ درصد و بازده پیل سوختی بسته به نوع آن حدود ۴۰ تا ۹۵ درصد می باشد. بنابراین بازده مجموعه شامل دستگاه الکترولیز، تانک ذخیره هیدروژن و پیل سوختی بسته به نوع تکنولوژی های به کار رفته در حدود ۱۵/۴ تا ۸۴/۸ درصد می باشد که این امر بیان می کند از میزان برق مصرفی در دستگاه الکترولیز آب تنها ۱۵/۴ تا ۸۴/۸ درصد آن در پیل سوختی تولید و به شبکه برمی گردد. البته باید تلفات سایر تجهیزات به مانند مبدل های الکترونک قدرت مورد نیاز را نیز در نظر گرفت که بر همین اساس در این مقاله بازده ۸۰ درصد برای کل مجموعه در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی یک سیستم ذخیره ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی باید بررسی شود که آیا تفاوت قیمت برق در زمان پرباری و کم باری به اندازه کافی زیاد است که بتواند تلفات این سیستم را جبران نماید یا نه. در این قسمت مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره ساز الکترولیز - تانک ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بر اساس فرضیات زیر تعیین می شود:

- در مرحله اول مدل پیشنهادی به منظور کارکرد دستگاه پیل سوختی که به مانند یک ژنراتور عمل می کند و بررسی تأثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان تعیین می شود. لذا فرض می شود سیستم الکترولیز مدت زمان کافی و همچنین توان الکتریکی مورد نیاز کافی جهت تولید هیدروژن در اختیار دارد و ظرفیت ذخیره سازی هیدروژن کافی است که بتواند هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی جهت تولید توان نامی این تجهیز را فراهم کند و با عملکرد پیل سوختی توان نامی به شبکه تحویل داده می شود. همان گونه که گفته شد این فرض معقول و منطقی است.
- در صورتی که سیستم الکترولیز خراب شود کل مجموعه نیز خراب شده و نمی تواند برق تولید کند. لذا خرابی دستگاه الکترولیز در مدل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است و نرخ خرابی کل سیستم ذخیره ساز با در نظر گرفتن خرابی دستگاه الکترولیز بدست آمده است.

○ بازده سیستم ذخیره‌ساز نیز در نظر گرفته شده است و فرض می‌شود توان نامی سیستم در حالت تولید توان با عملکرد پیل سوختی برابر با حاصل ضرب بازده سیستم در توان مصرفی با عملکرد دستگاه الکترولیز می‌باشد. در این پایان‌نامه یک توان نامی برای حالت عملکرد پیل سوختی در نظر گرفته شده است و لذا توان مصرفی در دستگاه الکترولیز از این توان بزرگتر خواهد بود. به علاوه میزان انرژی تولیدی پیل سوختی نیز کمتر از انرژی مصرفی دستگاه الکترولیز می‌باشد که در این مقاله نیز یک میزان انرژی نامی مشخص برای پیل سوختی در نظر گرفته شده و لذا واضح است که انرژی مصرفی دستگاه الکترولیز بیشتر از این مقدار خواهد بود.

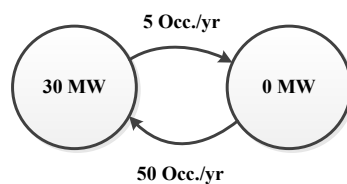
بنابراین مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز به مانند مدل مارکوف دو حالت می‌باشد اما میزان توان نامی آن بر اساس حجم مخزن ذخیره هیدروژن و مدت زمان عملکرد دستگاه الکترولیز در مدت زمان مشخصی دوام دارد. این امر بر اساس انرژی نامی سیستم ذخیره‌ساز مشخص می‌شود که فرض می‌شود سیستم توان نامی را برای مدت زمان مشخصی دارا می‌باشد. به عنوان نمونه یک سیستم ذخیره‌ساز با توان نامی پیل سوختی 30 MW و انرژی نامی 120 MWh این مفهوم را می‌رساند که حجم ذخیره‌ساز هیدروژن و مدت زمان عملکرد دستگاه الکترولیز به گونه‌ای است که این سیستم در حالت عملکرد پیل سوختی می‌تواند تا 4 ساعت توان نامی 30 مگاواتی را تولید نماید. همچنین اگر بازده کل سیستم 80 درصد باشد این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که توان مصرفی دستگاه الکترولیز 37/5 مگاوات و انرژی مصرفی به منظور تولید انرژی نامی 150 مگاوات ساعت خواهد بود. در صورتی که یک سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی دارای N واحد جداگانه باشد مدل قابلیت اطمینان هر کدام از واحدها به صورت مدل مارکوف دو حالت خواهد بود. هر کدام از این واحدها دستگاه الکترولیز، مخزن ذخیره هیدروژن و دستگاه پیل سوختی مجزا خواهند داشت اما ممکن است مخزن ذخیره آن‌ها مشترک باشد. با توجه به اینکه نرخ خرابی مخزن ذخیره هیدروژن بسیار ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد می‌توان از تأثیر خرابی آن بر مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز صرف‌نظر نمود و لذا می‌توان گفت که N واحد کاملاً مجزا بوده و مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز شامل N واحد به صورت نشان داده شده در شکل 6 خواهد بود. با خراب شدن هر کدام از واحدها توان مربوط به آن واحد صفر شده و توان کل سیستم مجموع توان بقیه واحدهای سالم می‌باشد. همچنین همان‌گونه که می‌دانیم فرض مدل مارکوف این است که در هر اتفاق تنها یک تجهیز خراب می‌شود و از خرابی‌های توانان صرف‌نظر می‌گردد و لذا همان‌گونه که در شکل مدل مشخص است در هر تغییر تنها توان یک واحد صفر شده و توان کل تنها به اندازه توان یک واحد کاهش می‌یابد.



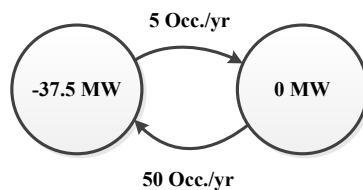
شکل (۶): مدل قابلیت اطمینان یک سیستم ذخیره‌ساز شامل N واحد

سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در موقع کم‌باری به مانند یک بار بر روی شبکه قرار گرفته و در دستگاه الکترولیز با مصرف توان الکتریکی هیدروژن تولید و در مخزن ذخیره، ذخیره می‌شود. لذا مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در حالت عملکرد دستگاه الکترولیز به صورت یک بار و یا تولید منفی با نرخ خرابی مربوطه مدل می‌شود؛ چرا که اگر دستگاه الکترولیز خراب شود دیگر از شبکه توان نمی‌گیرد و بار اعمالی به شبکه توسط سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی صفر خواهد شد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان یک سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در حالت عملکرد دستگاه الکترولیز دو حالت خواهد بود با این تفاوت که مقدار توان سیستم در حالت سالم بودن، منفی می‌باشد. همچنین در صورتی که یک سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی با تعداد N واحد مستقل وجود داشته باشد مدل قابلیت اطمینان آن به مانند شکل 6 خواهد بود با این تفاوت که توان‌ها منفی می‌باشد؛ چرا که در حالت عملکرد دستگاه الکترولیز، سیستم به صورت یک بار به شبکه اعمال می‌گردد. همان‌گونه که در شکل 6 مشخص است با خراب شدن هر کدام از واحدها - که در نتیجه خراب شدن تجهیزات

هر واحد می‌باشد- از توان مصرفی سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی کاسته می‌شود. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که در حالت عملکرد دستگاه الکترولیز توانی که سیستم مصرف می‌کند بر اساس میزان بازده سیستم بیشتر از توان تولیدی حالت عملکرد پیل سوختی است و لذا در مدل قابلیت اطمینان، توان مصرفی الکترولیز از توان تولیدی پیل سوختی بزرگتر خواهد بود. بنابراین در مطالعه قابلیت اطمینان دو مدل یکی برای پیل سوختی با توان تولیدی مثبت و دیگری برای الکترولیز با توان تولیدی منفی وجود دارد. همان‌گونه که گفته شد توان مصرفی الکترولیز از توان تولیدی پیل سوختی بزرگتر است و لذا در نهایت اگر بنا باشد که قابلیت اطمینان سیستم قدرت بر اساس این دو مدل مطالعه شود مسلماً قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد؛ چرا که توان منفی تولیدی (بار اعمالی الکترولیز) از توان تولیدی پیل سوختی بیشتر است و در نتیجه به صورت خالص به دلیل این‌که بازده سیستم یک نیست یک بار به سیستم اعمال شده است. اگر بنا باشد انرژی ملاک سنجش باشد نیز همین نتیجه بدست می‌آید و سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی سبب اتلاف مقداری انرژی می‌گردد. به عنوان مثال اگر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی با توان نامی حالت پیل سوختی ۳۰ مگاوات، انرژی نامی ۱۲۰ مگاوات ساعت، بازده ۸۰ درصد، نرخ خرابی ۵ بار در سال و نرخ تعمیر ۵۰ بار در سال در نظر گرفته شود مدل حالت پیل سوختی و حالت الکترولیزی این سیستم به صورت شکل‌های ۷ و ۸ خواهد بود. البته می‌توان توان حالت پیل سوختی و حالت الکترولیزی را با هم مساوی در نظر گرفت اما در این صورت برای این‌که بازده سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۱ نیست، سیستم باید مدت زمان بیشتری به صورت الکترولیز کار کند. به عنوان نمونه اگر بازده سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۸۰ درصد باشد و انرژی تولیدی ۱۲۰ مگاوات ساعت، برای این‌که سیستم بتواند به صورت پیل سوختی ۴ ساعت با توان ۳۰ مگاوات برق تولید کند باید سیستم ۵ ساعت با توان ۳۰ مگاوات به صورت الکترولیز کار کند تا انرژی ۱۵۰ مگاوات ساعت را مصرف نماید.



شکل (۷): مدل حالت پیل سوختی



شکل (۸): مدل حالت الکترولیزی

نکته‌ای که باید در این‌جا بدان توجه نمود این است که سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی توان را در موقع کم‌باری مصرف می‌کند و در موقع پرباری به شبکه تحویل می‌دهد. برای این‌که بتوان این کارکرد را مدل نمود بهتر است تأثیر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بر بار سیستم دیده شود. اگر فرض شود سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در کمینه بار به صورت الکترولیز عمل می‌کند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کمینه بار سیستم در طول سال به اندازه توان مصرفی دستگاه الکترولیز اضافه شده است. همچنین اگر فرض شود که سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در پیک بار به صورت دستگاه پیل سوختی در کاهش پیک بار عمل می‌کند می‌توان نتیجه گرفت که میزان پیک بار سالانه به اندازه توان تولیدی پیل سوختی کاهش می‌یابد و بر این اساس به مانند شکل ۹ تأثیر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت لحاظ

می‌گردد. در این شکل I_{max} بیشینه پیک بار، I_{min} کمینه پیک بار، P_g توان تولیدی دستگاه پیل سوختی و P_m توان مصرفی دستگاه الکترولیز آب می‌باشد.

به منظور در نظر گرفتن نرخ خرابی سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی نیز می‌توان از مدل احتمال شرطی استفاده نمود. بنابراین به منظور بررسی تأثیر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بر شاخص‌های کفایت سیستم قدرت به صورت زیر عمل می‌شود:

○ در شرایطی که سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی وجود ندارد با توجه به واحدهای موجود جدول COPT واحدهای تولید بدست آورده می‌شود.

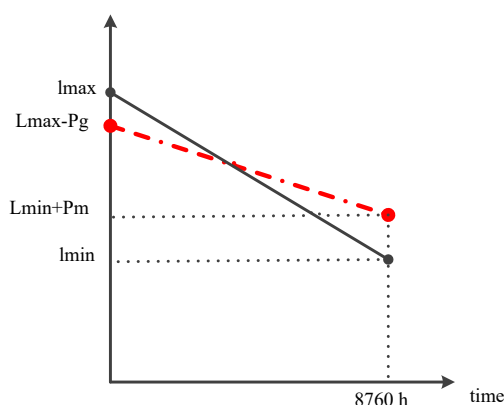
○ با مقایسه جدول COPT موجود و منحنی تداوم بار شاخص‌های مربوطه تعیین می‌گردد. (شاخص S_0)

○ به منظور بررسی تأثیر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در منحنی تداوم بار پیک بار بیشینه به اندازه توان تولیدی پیل سوختی کم و پیک بار کمینه به اندازه توان مصرفی دستگاه الکترولیز افزایش داده می‌شود و شاخص‌ها در این حالت بر اساس همان جدول COPT بدست می‌آید. (شاخص S_p)

○ به منظور تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن خرابی سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی از مدل احتمال شرطی بر اساس رابطه زیر استفاده می‌شود. در این رابطه P احتمال سالم بودن سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی و Q احتمال خراب بودن آن است.

$$S = (S_0 \times P) + (S_p \times Q)$$

(۵)



شکل (۹): تأثیر سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بر منحنی تداوم بار

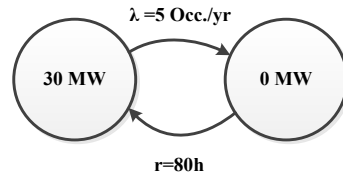
۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی کارایی تکنیک پیشنهادی در این مرحله، مطالعات کفایت دو سیستم آزمایش RBTS و IEEE-RTS با حضور سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی انجام می‌شود. در این مطالعه یک سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۳۰ مگاواتی یک واحدی با قابلیت تولید ۱۲۰ مگاوات ساعت انرژی در نظر گرفته می‌شود. بازده این سیستم ۸۰ درصد بوده و مقدار نرخ خرابی عناصر تشکیل دهنده این سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است.

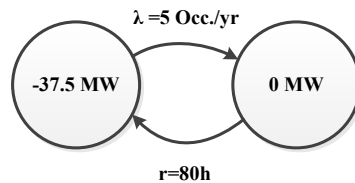
جدول (۱): نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده سیستم ذخیره‌ساز نمونه

اجزای تشکیل دهنده	متوسط زمان تعمیر (ساعت)	نرخ خرابی (تعداد در سال)
دستگاه الکترولیز	۱۰۰	۲
مخزن ذخیره هیدروژن	۱۰۰	۱
دستگاه پیل سوختی	۵۰	۲
مقادیر معادل	۸۰	۵

بر این اساس مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در دو حالت عملکرد تولیدکننده برق در پیل سوختی و مصرف‌کننده برق در الکترولیز به صورت نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که این سیستم قابلیت تولید انرژی ۱۲۰ مگاوات ساعت را دارد. بنابراین در مواقع بار زیاد تنها تا ۴ ساعت می‌تواند ۳۰ مگاوات را تولید نماید. به منظور تولید این توان باید در حالت الکترولیزی ۳۷/۵ مگاوات برق مصرف کند.



شکل (۱۰): مدل قابلیت اطمینان حالت پیل سوختی

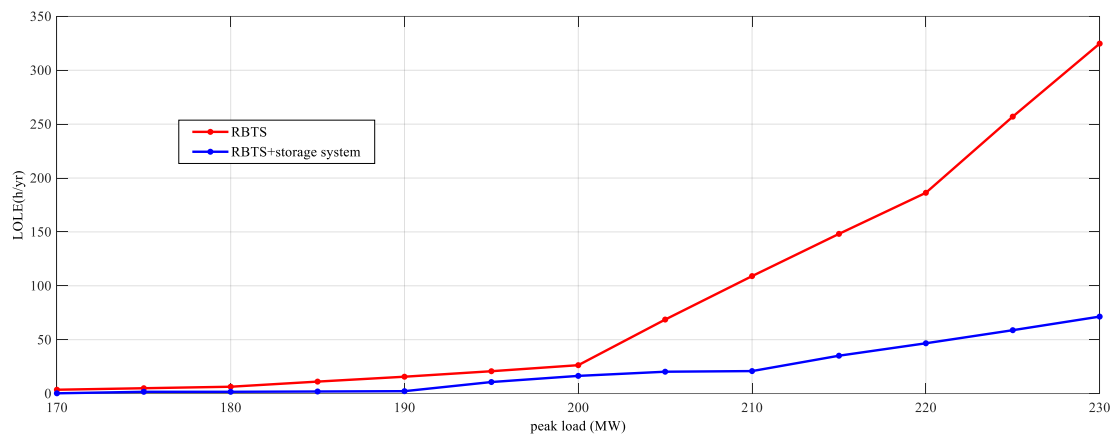


شکل (۱۱): مدل قابلیت اطمینان حالت الکترولیزی

با توجه به نرخ خرابی و متوسط زمان تعمیر احتمال سالم و یا خراب بودن سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی بدست آورده شده است:

$$P = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{8760/80}{5 + 8760/80} = 0.96, Q = 1 - P = 0.04$$

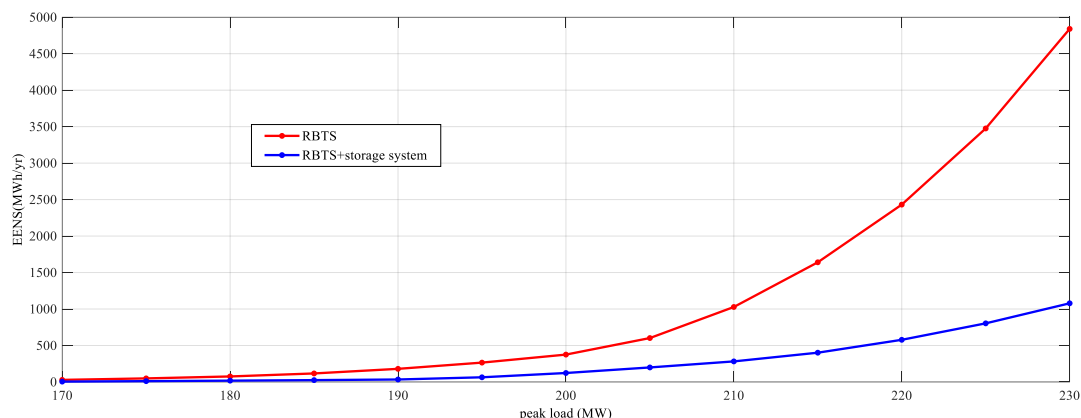
(۶)



شکل (۱۲): نمودار متوسط قطع بار بر حسب پیک بار

سیستم RBTS دارای ۱۱ واحد متداول با توان تولیدی ۲۴۰ مگاوات واحد نصب شده شامل ۲ واحد ۵ مگاواتی، یک واحد ۱۰ مگاواتی، ۵ واحد ۲۰ مگاواتی و ۳ واحد ۴۰ مگاواتی با اوج بار سالانه ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. به منظور انجام مطالعات کفایت سیستم قدرت در حضور سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی، در این قسمت دو حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول همان سیستم RBTS بدون اضافه کردن سیستم جدید بوده و در حالت دوم سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۳۰ مگاواتی با مشخصات گفته شده به این سیستم اضافه می‌شود. مدل بار به صورت یک خط مستقیم بوده که از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد پیک بار ماکزیمم جریان دارد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ شاخص‌های مقدار متوسط بار قطع شده و متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار به ازای هر دو حالت بیان شده در فوق آورده شده است.

همان‌گونه که مشخص است با افزایش پیک بار شاخص‌های مقدار متوسط بار قطع شده و انرژی تأمین نشده افزایش یافته و قابلیت اطمینان سیستم کاهش می‌یابد. همچنین از این دو جدول نتیجه می‌شود که سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید بسیار موثر بوده‌اند.



شکل (۱۳): نمودار انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار

در این بخش پیک بار قابل تغذیه برای سیستم تست RBTS و همچنین زمانی که یک سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۳۰ مگاواتی به آن اضافه شده باشد در شرایطی که میزان انرژی تأمین نشده از مقادیر مشخص تجاوز ننماید بدست آورده شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین قابلیت افزایش پیک بار قابل تغذیه به شرط این‌که مقدار متوسط انرژی تأمین نشده از مقدار مجاز تجاوز نکند با اضافه شدن سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که در این جداول نشان داده شده است اضافه شدن سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی می‌تواند قابلیت پیک بار قابل تغذیه را افزایش دهد.

جدول (۲): پیک بار قابل تغذیه

Acceptes EENS	100 MWh/yr	200 MWh/yr	300 MWh/yr	400 MWh/yr
Case I	180 MW	190 MW	195 MW	200 MW
Case II	195 MW	205 MW	210 MW	210 MW

جدول (۳): قابلیت افزایش پیک بار قابل تغذیه

Acceptes EENS	100 MWh/yr	200 MWh/yr	300 MWh/yr	400 MWh/yr
Case II	15 MW	15 MW	15 MW	10 MW

مشخصات سیستم آزمایش IEEE-RTS در پیوست دوم آورده شده است. بار نیز به صورت یک خط راست که از ۱۰۰ درصد تا ۶۰ درصد مقدار ماکزیمم اوج بار سالانه امتداد دارد مدل شده است. مقدار اوج بار سالانه ۲۸۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. در این قسمت تعداد ۱ تا ۵ سیستم ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی ۳۰ مگاواتی با مشخصات گفته شده در قبل به این سیستم اضافه شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان میزان قطع بار، میزان انرژی تأمین نشده و قابلیت افزایش اوج بار قابل تغذیه - به شرط اینکه مقدار شاخص متوسط انرژی تأمین نشده از مقدار بدست آمده در حالت پایه برای این مقدار بار تجاوز نکند - محاسبه شده است. نتایج این مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است اضافه شدن سیستم‌های ذخیره‌ساز الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌دهند.

جدول (۴): مطالعه قابلیت اطمینان سیستم IEEE-RTS

Added systems	LOLE (h/yr)	EENS (MWh/yr)	PLCC (MW)	IPLCC (MW)
0	112.9085	16984	2850	0
1	100.3366	14755	2872	22
2	89.8462	12806	2893	43
3	81.4793	11065	2914	64
4	73.3801	9509	2935	85
5	65.1861	8139	2955	105

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی تحلیلی به منظور مطالعه کفایت یک سیستم قدرت با حضور سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی گردید. ابتدا برای سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی یک مدل قابلیت اطمینان تحلیلی که هم خرابی عناصر تشکیل دهنده این سیستم‌ها و هم اصول عملکرد این سیستم را در نظر می‌گیرد، بدست آورده شد. بر اساس این مدل، این سیستم‌ها در دو حالت تولیدکننده برق و مصرف‌کننده برق به صورت واحدهای تولید دو حالتی مدلسازی شده و در مطالعات قابلیت اطمینان استفاده می‌شوند. با توجه به این که در مدل بدست آمده ظرفیت حالت مصرف‌کننده برق به صورت تولید منفی (بار مصرفی) بوده و به دلیل بازده سیستم که کمتر از ۱ است توان آن از حالت تولیدکننده برق بیشتر است این گونه به نظر می‌رسد که باید اضافه شدن سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی به دلیل این که به مانند اضافه شدن یک بار (تفاوت مصرف و تولید مثبت بوده و روی هم رفته میزان مصرفش بیشتر از میزان تولید است) می‌باشد منجر به کاهش قابلیت اطمینان گردد اما اگر زمان عملکرد حالت مصرف‌کننده برق (الکترولیز) در حالت کمینه و عملکرد تولیدکننده برق (پیل سوختی) در حالت بیشینه در مدل بار در نظر گرفته شود نتیجه گرفته شد که حضور سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی موجب بهبود شاخص‌های کفایت سیستم قدرت شامل متوسط زمان قطع بار، متوسط انرژی تامین نشده می‌گردد. تکنیک پیشنهادی به منظور ارزیابی کفایت سیستم‌های آزمایش RBTS و IEEE-RTS استفاده شد. نتیجه این ارزیابی نشان داد که استفاده از سیستم الکترولیز - ذخیره هیدروژن - پیل سوختی قابلیت اطمینان سیستم قدرت را بهبود می‌دهد.

References

مراجع

- [1] Zhang *et al.*, "Development of photovoltaic-electrolyzer-fuel cell system for hydrogen production and power generation," *Energy*, vol. 263, issue 3, p. 125566, 2023.
- [2] S. Wang *et al.*, "Numerical assessment of a hybrid energy system based on solid oxide electrolyzer, solar energy and molten carbonate fuel cell for the generation of electrical energy and hydrogen fuel with electricity storage option," *Journal of Energy Storage*, vol. 54, p. 105274, 2022.
- [3] M. Shaygan *et al.*, "Energy, exergy, advanced exergy and economic analyses of hybrid polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell and photovoltaic cells to produce hydrogen and electricity," *Journal of Cleaner Production*, vol. 234, pp. 1082-1093, 2019.
- [4] B. Zafar, "Design of a renewable hybrid photovoltaic-electrolyze-PEM/fuel cell system using hydrogen gas," *International Journal of Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 201-207, 2019.
- [5] Q. Li *et al.*, "Coordinated control of electric-hydrogen hybrid energy storage for multi-microgrid with fuel cell/electrolyzer/PV/battery," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103110, 2021.

- [6] A. Abdollahipour, H. Sayyaadi, "Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems," *Energy*, vol. 260, p. 124944, 2022.
- [7] M. M. Rahman *et al.*, "Techno-Economic Analysis of Hybrid PV/Wind/Fuel-Cell System for EVCS," in *2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, IEEE, 2021.
- [8] E. Cetin *et al.*, "Electrical analysis of a hybrid photovoltaic-hydrogen/fuel cell energy system in Denizli, Turkey," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 9, pp. 975-981, 2009.
- [9] S. Mukerjee *et al.*, "Life and reliability of solid oxide fuel cell-based products: a review," in *Solid Oxide Fuel Cell Lifetime and Reliability*, 2017, pp. 173-191.
- [10] J. Wang, "System integration, durability and reliability of fuel cells: Challenges and solutions," *Applied Energy*, vol. 89, pp. 460-479, 2017.
- [11] A. Vasilyev *et al.*, "Dynamic reliability assessment of PEM fuel cell systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 210, p. 107539, 2021.
- [12] M. Tanrioven, M. S. Alam, "Reliability modeling and assessment of grid-connected PEM fuel cell power plants," *Journal of Power Sources*, vol. 142, no. 1-2, pp. 264-278, 2005.
- [13] M. Tanrioven, M. S. Alam, "Reliability modeling and analysis of stand-alone PEM fuel cell power plants," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 915-933, 2006.
- [14] N. Norazahar *et al.*, "Degradation modelling and reliability analysis of PEM electrolyzer," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 842-856, 2024.
- [15] A. Al-Douri, K. M. Groth, "Hydrogen production via electrolysis: State-of-the-art and research needs in risk and reliability analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 63, pp. 775-785, 2024.
- [16] A. Ghaedi, M. Mahmoudian, R. Sedaghati, "Reliability analysis of power system considering renewable resources, chp units, energy storage devices and demand response program," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 157-164, 2025.
- [17] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, "The Impact of Vanadium-Redox Batteries on the Reliability of Power Systems Integrated with Current-Type Tidal-Turbines," *Energy Engineering and Management*, vol. 12, no. 4, pp. 2-17, 2023.
- [18] M. Y. Divani *et al.*, "Security-constrained optimal scheduling and operation of island microgrids considering demand response and electric vehicles," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, p. e13178, 2021.