

مقاله علمی-ترویجی

طراحی اقتصادی یک ریزشبکه هوشمند با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO

سید مهدی حکیمی/ استادیار گروه قدرت دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند / دماوند - ایران / sm_hakimi@damavandiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک سیستم میکروشبکه هوشمند متشکل از توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، میکروتوربین و باتری جهت تامین یک الگوی بار منطقه مورد مطالعه طراحی می‌شود. هدف از این طراحی، کمینه کردن هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم تولید انرژی، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان آن، می‌باشد. فرض می‌شود که از میان تجهیزات سیستم، احتمال خروج اضطراری سه جز عمده، یعنی توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی و مبدل DC/AC وجود دارد. هزینه‌های سیستم شامل سرمایه‌گذاری اولیه، بهره‌برداری و نگهداری و همچنین هزینه از دست رفتن بار می‌باشد. داده‌های باد و تابش نیز مربوط به مناطق شمال غرب ایران می‌باشند. برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده می‌گردد. ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند با ارزیابی قابلیت اطمینان، باعث بالا رفتن حجم و در نتیجه، بالا رفتن زمان انجام محاسبات می‌شود. یک مدل تقریبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌گردد که منجر به کاهش قابل توجهی در زمان انجام محاسبات می‌شود. خوشبختانه، مقایسه نتایج بدست آمده از مدل تقریبی با نتایج حاصله از مدل دقیق، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این مدل، با وجود کاهش چشمگیر حجم محاسبات می‌باشد. در این مقاله شهرک اکباتان به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ریزشبکه هوشمند، شاخص‌های قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی اجتماع ذرات

The Economic Design of a Smart Microgrid Considering the Reliability Indices Using the PSO Algorithm

Seyed Mehdi Hakimi/ Electrical Engineering Department, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran / sm_hakimi@damavandiau.ac.ir

Abstract

In this study a novel intelligent method is applied to the problem of sizing in a hybrid power system such that the demand of residential area is met and the results are analyzed from the viewpoint of meeting the demand and total costs. This study is performed for Ganje area in north-western Iran. The systems consist of fuel cells, some wind units, some electrolyzers, a reformer, a compressor, an anaerobic reactor and some hydrogen tanks. The system is assumed to be stand-alone and uses the biomass as an available energy resource. Our aim is to minimize the total costs of the system such that the demand is met. PSO algorithm is used for optimal sizing of system's components.

Keywords: Renewable energy, intelligent Micro network system, reliability indicators, particle assembly optimization

باتری مطالعه شده است. در [۹] تعیین ظرفیت بهینه یک سیستم ترکیبی خورشیدی، باتری و پیل سوختی مستقل از شبکه با هدف حداقل سازی هزینه‌ها بررسی شده است و به این نتیجه رسیده است که استفاده همزمان از باتری و پیل سوختی، بهینه‌تر از به کار بردن یکی از آنها می‌باشد. در [۱۰] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی - باتری با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای چند سایت مختلف مطالعه شده است. در [۱۱] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی مبتنی بر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در حالت عدم اتصال به شبکه، مطالعه شده و هدف آن حداقل سازی هزینه‌ها بوده به صورتی که بار منطقه مسکونی مورد مطالعه تامین شود. در [۱۲-۱۳] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری با هدف کمینه‌سازی هزینه بررسی شده است. قابلیت اطمینان، یکی از قیود این بهینه‌سازی می‌باشد. در [۱۴] بهینه‌سازی سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی با ذخیره‌ساز هیدروژن از بعد اقتصادی مطالعه شده است. در [۱۵] سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری مطالعه شده است و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ذخیره‌ساز هیدروژن به‌عنوان ذخیره‌ساز بلند مدت سیستم، گزینه مناسبی می‌باشد. در [۱۶] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری برای منطقه‌ای در سنگال که شبکه برق سراسری در آن وجود ندارد بررسی شده است. هدف این مقاله حداقل سازی هزینه سالیانه و همچنین حداقل کردن بار تامین نشده می‌باشد.

در این مقاله یک سیستم میکروشبکه هوشمند متشکل از توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، میکروتوربین و باتری جهت تامین یک الگوی بار منطقه مورد مطالعه طراحی می‌شود. هدف از این طراحی، کمینه کردن هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم تولید انرژی، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان آن، می‌باشد. فرض می‌شود که از میان تجهیزات سیستم، احتمال خروج اضطراری سه جزء عمده، یعنی توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی و مبدل DC/AC وجود دارد. هزینه‌های سیستم شامل سرمایه‌گذاری اولیه، بهره‌برداری، نگهداری، و همچنین هزینه از دست رفتن بار می‌باشد. داده‌های باد و تابش نیز مربوط به مناطق شمال غرب ایران می‌باشند. برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده می‌گردد. ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند با ارزیابی قابلیت اطمینان، باعث بالا رفتن حجم، و در نتیجه، بالا رفتن زمان انجام محاسبات می‌شود. یک مدل تقریبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم آرایه می‌گردد که منجر به کاهش قابل توجهی در زمان انجام محاسبات می‌شود. خوشبختانه، مقایسه نتایج بدست آمده از مدل تقریبی با نتایج حاصله از مدل دقیق، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این مدل، با وجود کاهش چشمگیر حجم محاسبات، می‌باشد. در این مقاله شهرک اکباتان به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است.

ساختار مقاله بدین صورت است که: در بخش دوم ساختار ریزشبکه هوشمند مورد مطالعه را بیان می‌کنیم. مدل سازی اجزای ریزشبکه هوشمند را در بخش سوم توضیح خواهیم داد. در بخش چهارم به ارزیابی قابلیت اطمینان خواهیم پرداخت. مدل سازی تعیین ظرفیت اجزای ریزشبکه‌های هوشمند را در بخش پنجم بررسی خواهیم کرد. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبکه هوشمند را نشان خواهیم داد. در نهایت به بیان نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

۲- ساختار ریزشبکه هوشمند مورد مطالعه

در این مقاله شهرک اکباتان به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است. این شهرک مسکونی از سه ریزشبکه هوشمند و یک پست

در یک ریزشبکه که به‌عنوان مثال از توربین بادی، آرایه خورشیدی، سیستم پشتیبان توان، سیستم ذخیره‌ساز و منابع پاسخ‌گویی بار استفاده می‌نماید، مساله بهینه‌سازی بسیار پیچیده است، زیرا در این شرایط می‌بایست قدرت توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، سیستم ذخیره‌ساز و همچنین پاسخ‌گویی بار با توجه به میزان وزش باد و تابش خورشید به‌نحوی محاسبه گردد که علاوه بر این که هزینه سیستم کمینه می‌شود، انرژی مورد نیاز نیز در تمام ساعات شبانه روز، با قابلیت اطمینان مطلوب و کیفیت توان قابل قبول تامین گردد. همچنین قدرت سیستم پشتیبان باید به اندازه‌ای باشد که بتواند در صورت عدم وزش باد و تابش خورشید، بارهای ضروری را تامین نماید. میکرو شبکه متصل به شبکه می‌تواند به خرید و یا فروش برق با شبکه سراسری بپردازد. در این صورت محاسبه ظرفیت بهینه مولدها، سیستم ذخیره‌ساز و توان خریداری شده از شبکه سراسری دشوارتر نیز می‌گردد. مسایل اقتصادی و قابلیت اطمینان نقاط ضعف سیستم‌هایی است که از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته استفاده می‌کنند. اینجا است که ضرورت تعیین بهینه ظرفیت مولدها، سیستم ذخیره‌ساز و سیستم پشتیبان مشخص می‌گردد، چرا که در صورت بهینه‌سازی صحیح علاوه بر دستیابی به قابلیت اطمینان لازم، هزینه الکتریسیته تولیدی نیز کمینه می‌شود و امکان رقابت انرژی‌های تجدیدپذیر با روش‌های دیگر تولید انرژی بیشتر می‌شود.

در [۱] تعیین سبب بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی-پیل سوختی - ابرخازن برای یک منطقه مسکونی که دسترسی به شبکه برق سراسری ندارد مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بهینه‌سازی این سیستم ترکیبی از نرم افزار HOMER استفاده شده است. در [۲] تعیین سبب سبب و مدیریت توان بهینه یک سیستم ترکیبی کوچک مستقل از شبکه برق سراسری با هدف تولید هیدروژن بررسی شده است و به این نتیجه رسیده است که هزینه‌های سیستم مورد مطالعه به بازدهی تجهیزات و قابلیت اطمینان بستگی دارد. به‌منظور بهینه‌سازی این سیستم از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در مرجع [۳] سیستم ترکیبی بر مبنای انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور تامین برق دو جزیره مستقل از شبکه مطالعه شده است. در این مقاله از نرم افزار HOMER به‌منظور بهینه‌سازی اقتصادی سیستم تامین توان استفاده شده است. در مرجع [۴] از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی سیستم تولید توان در یک ریزشبکه استفاده شده است. متغیرهای این بهینه‌سازی سبب بهینه تجهیزات تولید توان می‌باشد. اهداف این بهینه‌سازی حداقل کردن هزینه‌های سالیانه سیستم و هزینه انرژی خریداری شده از شبکه برق سراسری است. در [۵] از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل به‌منظور مشخص کردن ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است. در این بهینه‌سازی هدف، یافتن توان اکتیو بهینه بوده است و فرض شده است که توان راکتیو واحدها مشخص باشد. در [۶] تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز در ریزشبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این بهینه‌سازی حداقل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری میکرو شبکه می‌باشد. در [۷] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بررسی گردیده است. هدف این مقاله حداقل سازی هزینه سالیانه تولید انرژی است. در این مقاله فرض شده که بار همیشه می‌بایست تامین گردد یا به عبارتی توانی از بارها نباید قطع شود. در منابع [۸-۱۰] برخی از کاربردهای سیستم مستقل از شبکه شامل منابع خورشیدی و ذخیره‌سازها بررسی شده‌اند. در [۸] بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه مبنی بر منابع خورشیدی و

سازنده توربین ارایه می‌شود و بیان‌کننده توان حقیقی می‌باشد که از توربین به باسبار منتقل می‌شود. توربین مورد استفاده در این مقاله از نوع SWT-50KW [۲۰] می‌باشد. توان نامی این توربین 50 kW است. مشخصه توان خروجی (P_{WG}) بر حسب سرعت باد (V_W) این توربین را می‌توان با رابطه (۳) تقریب زد.

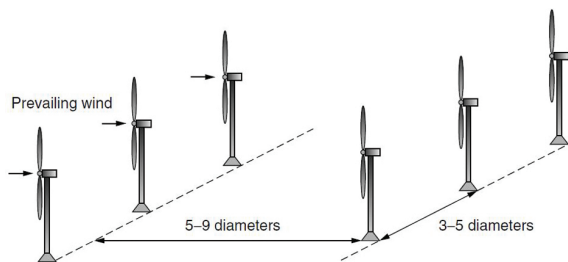
$$P_{WG} = \begin{cases} 0 & ; V_W \leq v_{cut\ in}, V_W \geq v_{cut\ out} \\ P_{WG,max} \times \left(\frac{V_W - v_{cut\ in}}{v_{rated} - v_{cut\ in}} \right)^m & ; v_{cut\ in} \leq V_W \leq v_{rated} \\ P_{WG,max} + \frac{P_{furl} - P_{WG,max}}{v_{cut\ out} - v_{rated}} \times (V_W - v_{rated}) & ; v_{rated} \leq V_W \leq v_{furl} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $v_{cut\ in}$ ، $v_{cut\ out}$ و v_{rated} به ترتیب سرعت‌های قطع پایین، سرعت قطع بالا و سرعت نامی (m/s) توربین بوده $P_{WG,max}$ بیشینه توان خروجی توربین (P_{furl} و (kW) نیز توان خروجی در سرعت قطع بالا می‌باشند. در ادامه کار m برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری نمونه برداری شده‌اند، حال آن‌که ارتفاع نصب (ارتفاع تویی) توربین‌های مورد استفاده ۱۵ متر می‌باشد. سرعت باد در ارتفاع تویی را می‌توان با استفاده از قانون توان^۱ به صورت زیر محاسبه نمود.

$$v_W^h = v_W^{ref} \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (4)$$

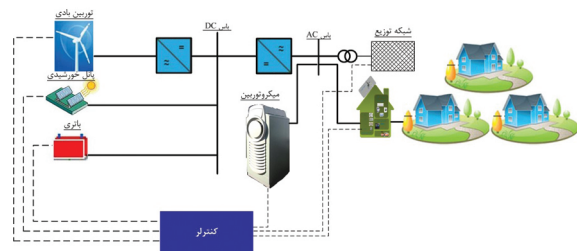
در رابطه فوق v_W^h سرعت باد در ارتفاع، h و v_W^{ref} سرعت باد در ارتفاع، اندازه‌گیری یا مرجع (h_{ref}) بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. α ، نمای رابطه بالا، به‌طور معمول بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ می‌باشد (در اینجا ۰/۱۴). سایر مشخصات توربین‌های به کار رفته در مرجع [۲۰] قابل مشاهده می‌باشد. نرخ خروج اضطراری توربین‌های بادی ۴ درصد [۱۹] لحاظ شده است.

در مواردی که بیش از یک توربین بادی نصب می‌شود، جریان باد بعد از عبور از یک توربین به توربین دیگری می‌وزد و مقدار انرژی آن کاهش یافته و سرعت وزش باد کم می‌شود. پس فواصل توربین‌های بادی باید به درستی انتخاب شده و همچنین محدودیت فضای در دسترس نیز در محاسبات در نظر گرفته شود. فواصل بهینه توربین‌های بادی (بر مبنای قطر توربین) از یکدیگر به‌منظور بیشینه تولید توان در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۱]. وسعت شهرک اکیاتان ۵/۹۴ کیلومتر مربع بوده که از این فضا حدود ۳ کیلومتر مربع آن قابلیت نصب توربین بادی را دارد. بر اساس شکل (۸-۴) و با توجه به قطر توربین بادی انتخاب شده (۱۸ متر) این فضا ظرفیت نصب حداکثر ۲۵۰۰ توربین بادی را دارد. قابل ذکر است که این قید به‌عنوان یکی از قیود بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه توربین‌های بادی به شبکه ۲۰ کیلوولت متصل می‌گردند.



شکل ۲: چیدمان بهینه توربین‌های بادی در مزرعه بادی

۶۳/۲۰ کیلوولت تشکیل شده است. همان‌طور که اشاره شد شهرک اکیاتان شامل فازهای ۱، ۲ و ۳ بوده که در این رساله هر فاز از شهرک اکیاتان به‌عنوان یک ریزشبهک هوشمند در نظر گرفته شده است. این ریزشبهک‌ها با یکدیگر اتصال الکتریکی ندارند، ولی هر یک از این ریزشبهک‌ها توسط یک کابل ۲۰ کیلوولت به پست ۶۳/۲۰ کیلوولت اتصال دارد. شبکه توزیع انرژی در شهرک اکیاتان با استفاده از کابل زیرزمینی ۲۰ کیلوولت می‌باشد. فرض می‌شود ریزشبهک هوشمند متشکل از توربین‌های بادی، پانل‌های خورشیدی، میکروتوربین و باتری، بارهای قابل کنترل (ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی، سیستم سرمایش/گرمایش و خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه) و بارهای غیرقابل کنترل می‌باشد. سیستم تولید توان در ریزشبهک هوشمند در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم تولید توان در ریزشبهک هوشمند

۳- مدل‌سازی اجزای ریزشبهک هوشمند

به منظور تأمین توان در ریزشبهک‌های هوشمند از واحدهای توربین بادی، آرایه‌های خورشیدی، میکروتوربین، باتری و مبدل AC/DC استفاده شده است که در ادامه به مدل‌سازی آنها می‌پردازیم.

۳-۱- آرایه‌های خورشیدی

داده‌های مربوط به توان تابیده شده بر سطح آرایه با استفاده از رابطه زیر به توان خروجی آن تبدیل می‌شود:

$$P_{PV} = \frac{G}{1000} \times P_{PV,rated} \times \eta_{PV,conv} \quad (1)$$

که در آن G ، توان تابش عمود بر سطح آرایه (W/m^2) و $P_{PV,rated}$ توان نامی هر آرایه بوده که به ازای $G=1000 (W/m^2)$ بدست می‌آید. $\eta_{PV,conv}$ نیز برابر با بازدهی مبدل DC/DC نصب شده بین هر آرایه و باسبار DC می‌باشد.

با توجه به در دست بودن مولفه‌های عمودی و افقی توان تابشی خورشید در هر لحظه، می‌توان توان تابیده شده (به‌صورت عمودی) بر سطح آرایه نصب شده با زاویه θ_{PV} را طبق رابطه زیر محاسبه نمود [۱۷]:

$$G(t, \theta_{PV}) = G_v(t) \times \cos(\theta_{PV}) + G_H(t) \times \sin(\theta_{PV}) \quad (2)$$

که در آن $G_H(t)$ و $G_v(t)$ به ترتیب نرخ تابش افقی و عمودی در گام زمانی t ام می‌باشند (W/m^2). سایر مشخصات آرایه‌های خورشیدی در [۱۸] قابل مشاهده می‌باشد. نرخ خروج اضطراری پنل‌های خورشیدی ۴ درصد در نظر گرفته شده است [۱۹]. در این مقاله فرض شده است که محل نصب پنل‌های خورشیدی بر روی پشت بام منازل بوده و با توجه به فضای در دسترس پشت بام بهینه ظرفیت مجاز قابل نصب محاسبه شده است.

۳-۲- توربین‌های بادی

توان خروجی توربین بادی مورد استفاده در این مطالعه در [۲۰] نمایش داده شده است. این منحنی به‌طور معمول توسط کارخانه

۳-۳- توان تولید شده توسط واحدهای تجدیدپذیر

یکی از نکات مهم در محاسبات قابلیت اطمینان، در نظر گرفتن احتمال خروج واحدهای تولیدکننده است. خروج واحدها ممکن است به صورت برنامه‌ریزی شده و یا به صورت اضطراری باشد. اگر فرض شود که به علت برخی مسایل، مانند خرابی، به ترتیب n_{WG}^{fail} توربین بادی و n_{PV}^{fail} آرایه خورشیدی از سیستم خارج شده باشند، آنگاه توان قابل تزریق به باس توسط واحدهای بادی و خورشیدی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$P_{ren} \left(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail} \right) = \left(N_{WG} - n_{WG}^{fail} \right) \times P_{WG} + \left(N_{PV} - n_{PV}^{fail} \right) \times P_{PV} \quad (5)$$

۳-۴- میکروتوربین

میکروتوربین در ریزشبکه هوشمند ۳ هنگامی توان تولید می‌کند که مقدار توان تولید شده توسط واحدهای خورشیدی و بادی و ذخیره‌ساز نتواند بار ریزشبکه هوشمند را تامین کند. در واقع مقدار توان تولید شده توسط میکروتوربین به مقدار توان تولیدی توسط این واحدها بستگی دارد که طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. از آنجا که ساعات استفاده از میکروتوربین محدود می‌باشد در محاسبات از خروج اضطراری این تجهیز صرف نظر شده است.

$$P_{MT}(t) = \left(\frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right) - P_{ren}(t) - (E_{bat}(t) - E_{batmin}) \times \eta_{discharge} \quad (6)$$

چنانچه این توان مورد نیاز از توان نامی میکروتوربین بیشتر باشد، از شبکه توزیع برق خریداری می‌شود.

۳-۵- باتری

محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$E_{batmin} \leq E_{bat}(t) \leq E_{batmax} \quad (7)$$

که در این رابطه E_{batmin} مینیمم ظرفیت ذخیره و E_{batmax} ماکزیمم ظرفیت ذخیره می‌باشد. مقدار حداقل انرژی ذخیره شده در باتری توسط حداکثر توانایی دشارژ باتری به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$E_{batmin} = (1 - DOD) \times E_{batmax} \quad (8)$$

در این رابطه DOD حداکثر توانایی دشارژ باتری می‌باشد. در این مقاله مقدار حداکثر توانایی دشارژ باتری برابر ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶- مبدل DC/AC

در نهایت نیز، یک مبدل DC/AC توان الکتریکی DC را جهت مصرف بار به توان AC با فرکانس مطلوب بار تبدیل می‌کند. اثر تلفات مبدل را می‌توان با بازدهی آن مدل نمود. مشخصات مبدل بکار رفته در مرجع [۱۸] قابل رویت می‌باشد.

۴- ارزیابی قابلیت اطمینان

در این بخش به بیان شاخص‌های قابلیت اطمینان، مدل قابلیت اطمینان سیستم و روش پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت اطمینان خواهیم پرداخت.

۴-۱- شاخص‌های قابلیت اطمینان

مراجع شاخص‌های متعددی را برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌ها ارائه کرده‌اند [۲۳، ۱۹، ۲۲] که از جمله آنها می‌توان به شاخص‌هایی نظیر امید قطع بار^۱ (LOLE)، امید از دست رفتن انرژی^۲ (LOEE) و یا امید انرژی تامین نشده^۳ (EENS)، احتمال از دست رفتن منبع^۴ (LPSF)، ضریب قطع معادل^۵ (ELF)، و موارد دیگری از

این دست اشاره نمود. در نهایت ضریب قطع معادل بار را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$ELF = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{Q(t)}{D(t)} \quad (9)$$

از آنجایی که ELF در برگزیده اطلاعات بیشتری، هم درباره تعداد قطعی‌ها و هم مقدار آنها، می‌باشد [۲۲]، در این مقاله از آن به‌عنوان معیار اصلی قابلیت اطمینان استفاده خواهد شد. البته، برای سیستم مورد بررسی در آن مطالعه این محدودیت برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- مدل قابلیت اطمینان سیستم

محاسبات قابلیت اطمینان انجام گرفته در این پژوهش، با فرض وجود احتمال خروج واحدهای تولید کننده توان، یعنی توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی، و همچنین احتمال خروج مبدل DC/AC، انجام گرفته‌اند.

نرخ خروج اضطراری^۶ (FOR) واحدهای بادی و خورشیدی، بر اساس اطلاعات ارائه شده در [۱۹] برابر با ۴ درصد در نظر گرفته شده است. در نتیجه هر واحد توربین بادی یا آرایه خورشیدی با احتمال ۹۶ درصد در دسترس خواهد بود. احتمال قرار گرفتن در هر وضعیت بر اساس تابع توزیع دوجمله‌ای قابل محاسبه می‌باشد [۲۴]. به‌عنوان مثال، احتمال خروج n_{WG}^{fail} توربین بادی از کل N_{WG} توربین نصب شده، و همچنین خروج n_{PV}^{fail} آرایه خورشیدی از کل N_{PV} نصب شده، برابر خواهد بود با:

$$f_{ren} \left(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail} \right) = \left[\left(\frac{N_{WG}}{n_{WG}^{fail}} \right) \times A_{WG}^{N_{WG} - n_{WG}^{fail}} \times (1 - A_{WG})^{n_{WG}^{fail}} \right] \times \left[\left(\frac{N_{PV}}{n_{PV}^{fail}} \right) \times A_{PV}^{N_{PV} - n_{PV}^{fail}} \times (1 - A_{PV})^{n_{PV}^{fail}} \right] \quad (10)$$

که در آن، A_{WG} و A_{PV} به ترتیب برابری با احتمال در دسترس بودن هر واحد توربین بادی و هر واحد آرایه خورشیدی می‌باشد. احتمال خروج سایر اجزای سیستم در مقایسه با توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی بسیار پایین است. ولی توجه به این نکته نیز ضروری است که مبدل DC/AC نقشی بسیار حیاتی در تامین بار سیستم دارد در نتیجه، در نظر گرفتن احتمال خروج آن، هر اندازه هم که بعید باشد، در محاسبات قابلیت اطمینان ضروری است.

هرچند به علت نبود مراجع کافی در زمینه بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت، یافتن نرخ خروج مبدل کمی در دسترس نبود، ولی در نهایت با ترکیب کردن اطلاعات موجود در [۲۷-۲۵]، نرخ خروج تقریبی یک مبدل DC/AC محاسبه گردید. با توجه به اینکه میانگین زمان تا خرابی^۷ (MTTF) هر تجهیز برابر با معکوس نرخ خرابی^{۱۰} آن می‌باشد [۲۸]، اگر نرخ خرابی یک مبدل fail/hr $105 \times 2/5$ فرض گردد [۲۹]، میانگین زمان تا خرابی آن حدوداً برابر با 37037 ساعت خواهد بود. از طرف دیگر در [۲۵] آمده است که میانگین زمان تا تعمیر^{۱۱} (MTTR) یک مبدل DC/AC حدوداً 40 ساعت است. اگر m نشان‌دهنده میانگین زمان تا خرابی و r میانگین زمان تا تعمیر یک تجهیز باشد، قابلیت اطمینان حالت پایدار، یا به عبارت بهتر احتمال دسترسی^{۱۲}، آن طبق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۴]:

$$A = \frac{m}{m + r} \quad (11)$$

با توجه به مطالب بالا، در این مقاله، دسترسی مبدل DC/AC برابر

قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی ارایه می‌گردد که علیرغم کاهش حجم و زمان محاسبات، از دقت خوبی برخوردار می‌باشد. در این روش، پیشنهاد می‌شود که به جای در نظر گرفتن تک وضعیت‌های مربوط به خروج توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی و در نهایت محاسبه امید ریاضی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم، از متوسط توان خروجی توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی استفاده گردد.

$$E[P_{ren}] = \sum_{s \in S} P_{ren}(s) \times f_p(s) \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$E[P_{ren}] = \sum_{n_{WG}^{fail}=0}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=0}^{N_{PV}} \left\{ P_{ren}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (15) حاصل می‌شود:

$$E[P_{ren}] = \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \left\{ (N_{WG} - n_{WG}^{fail}) \times P_{WG} \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\}}_A \quad (15)$$

$$+ \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \left\{ (N_{PV} - n_{PV}^{fail}) \times P_{PV} \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\}}_B$$

از رابطه بالا روابط زیر بدست می‌آیند:

$$A = P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ (N_{WG} - n_{WG}^{fail}) \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (16)$$

$$A = P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ N_{WG} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) - n_{WG}^{fail} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (17)$$

$$A = P_{WG} \times N_{WG} \times \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail})}_C - P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ n_{WG}^{fail} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (18)$$

$$C = \left(\frac{N_{WG}}{n_{WG}} \right) \times A_{WG}^{N_{WG} - n_{WG}^{fail}} \times (1 - A_{WG}^{n_{WG}^{fail}}) \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \left\{ \left(\frac{N_{PV}}{n_{PV}} \right) \times A_{PV}^{N_{PV} - n_{PV}^{fail}} \times (1 - A_{PV}^{n_{PV}^{fail}}) \right\} \quad (19)$$

با توجه به بسط دوجمله‌ای، $D=1$ در نتیجه:

$$A = P_{WG} \times N_{WG} - P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ n_{WG}^{fail} \times \left(\frac{N_{WG}}{n_{WG}^{fail}} \right) \times A_{WG}^{N_{WG} - n_{WG}^{fail}} \times (1 - A_{WG}^{n_{WG}^{fail}}) \right\} \quad (20)$$

E با امید توزیع دوجمله‌ای بوده که با توجه به رابطه زیر [24]:

$$\sum_{x=0}^n x \times \binom{n}{x} \times p^x \times q^{n-x} = n \times p \quad (21)$$

رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$A = P_{WG} \times N_{WG} \times A_{WG} \quad (22)$$

با تکرار روابط فوق B نیز به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$B = P_{PV} \times N_{PV} \times A_{PV} \quad (23)$$

در نتیجه اثبات می‌شود که:

$$E[P_{ren}] = N_{WG} \times P_{WG} \times A_{WG} + N_{PV} \times P_{PV} \times A_{PV} \quad (24)$$

۵- مدل‌سازی تعیین ظرفیت اجزای ریزشبکه‌های هوشمند

در این بخش ظرفیت بهینه اجزای ریزشبکه هوشمند بطور همزمان مشخص می‌شود. تابع هدف این مساله مجموع هزینه‌های مربوط به تعیین ظرفیت بهینه بوده که در ادامه توضیح داده می‌شود.

۵-۱- طرح مساله تعیین ظرفیت بهینه

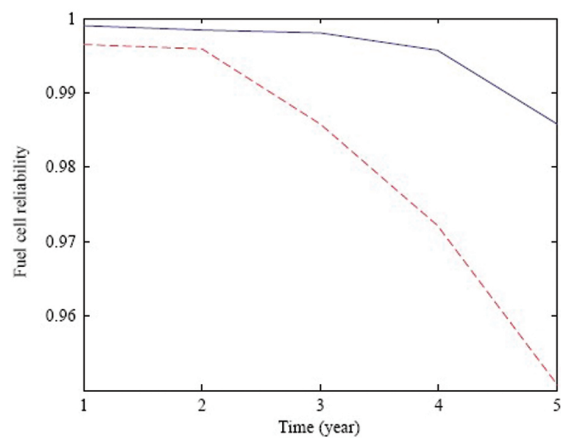
هدف این بخش یافتن اندازه اجزای ریزشبکه هوشمند، یعنی

با ۹۹/۸۹ درصد در نظر گرفته می‌شود که در مقایسه با توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی بسیار قابل اطمینان‌تر می‌باشد. در نهایت، با فرض تغذیه شدن بار توسط N_{inv} مبدل DC/AC نصب شده به طور موازی، احتمال خروج n_{WG}^{fail} توربین بادی، n_{PV}^{fail} آرایه خورشیدی، و n_{inv}^{fail} مبدل DC/AC از رابطه (۱۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$f_{system}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}, n_{inv}^{fail}) = f_{ren}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \times \left(\frac{N_{inv}}{n_{inv}^{fail}} \right) \times A_{inv}^{N_{inv} - n_{inv}^{fail}} \times (1 - A_{inv}^{n_{inv}^{fail}}) \quad (12)$$

که در رابطه بالا، A_{inv} نشان‌دهنده احتمال دسترسی مبدل DC/AC می‌باشد.

شکل (۳) نیز احتمال دسترسی یک پیل سوختی طی یک دوره ده‌ساله را نشان می‌دهد [۳۰]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دسترسی پیل سوختی در طول ۵ سال اول (عمر مفید پیل سوختی) عمدتاً بالای ۹۹ درصد می‌باشد. از این‌رو در این رساله از خروج اضطراری پیل سوختی صرف‌نظر شده است.



شکل ۳: قابلیت اطمینان پیل سوختی بر حسب زمان (خط پیوسته: ۵ سال اول، خطچین: ۵ سال دوم) [۲۷].

۴-۳- روش پیشنهادی ارزیابی قابلیت اطمینان

جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم می‌بایست تمامی وضعیت‌های ممکن سیستم در نظر گرفته شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان، با توجه به احتمال قرار گرفتن سیستم در هر وضعیت و همچنین میزان بار از دست رفته مربوط به آن وضعیت، محاسبه شود.

چنان‌که پیش‌تر نیز بدان اشاره گردید، در این مقاله تنها احتمال خروج توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، و مبدل DC/AC در نظر گرفته شده‌است. به‌عنوان مثال، برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستمی متشکل از ۱۴ توربین بادی و ۱۹۹ آرایه خورشیدی، لازم است که سیستم برای $2 \times 15 \times 200 = 6000$ وضعیت مختلف مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب، اگر هدف تحلیل رفتار سالانه سیستم با گام‌های زمانی یک ساعته باشد، هر سال نیازمند بررسی $8760 \times 6000 = 52560000$ وضعیت خواهد بود. حال اگر بنا بر آن باشد که سیستم فوق با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی گردد، و فرض شود که الگوریتم شامل ۳۰ ذره بوده که در ۲۰۰ تکرار به بهینه‌سازی سیستم می‌پردازند، لازم است که سیستم مورد نظر برای مدتی برابر با $200 \times 30 = 6000$ سال شبیه‌سازی و تحلیل شود. انجام محاسبات فوق بسیار زمان‌بر است (هر چند که زمان انجام این محاسبات در مقایسه با عمر سیستم بسیار کم می‌باشد) و یافتن یک روش تقریبی که بتواند سیستم بالا را، با دقت کافی، و در زمان کمتری بهینه کند، گزینه‌ای مطلوب خواهد بود.

با توجه به مطالب بالا، در ادامه یک روش پیشنهادی برای محاسبه

t . $P_{sell}(t)$ میزان توان فروخته شده به شبکه توزیع در ساعت t و $Price_{buy}(t)$ و $Price_{sell}(t)$ به ترتیب هزینه هر کیلووات ساعت برق خریداری شده از شبکه توزیع و هزینه هر کیلووات ساعت برق فروخته شده به شبکه توزیع در ساعت t است. تابع هدف فوق باید با در نظر گرفتن قیود زیر بهینه گردد:

$$E[ELF] \leq ELF_{max} \quad (32)$$

$$0 \leq N_i \quad (33)$$

$$0 \leq \theta_{pv} \leq \frac{\pi}{2} \quad (34)$$

$$E_{tank}(0) \leq E_{tank}(8760) \quad (35)$$

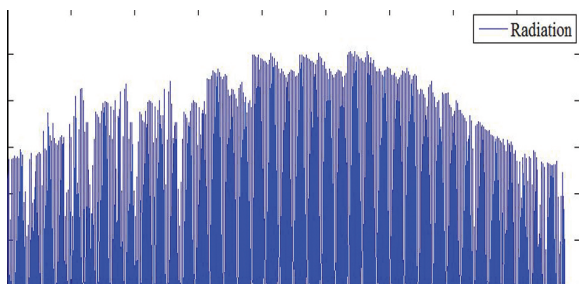
$$P_{sell}(t) \leq N_{TR}(\max) \quad (36)$$

$$P_{buy}(t) \leq N_{TR}(\max) \quad (37)$$

که θ_{pv} زاویه نصب آرایه‌های خورشیدی بوده و قید (35) نیز بیانگر این نکته است که انرژی ذخیره شده در تانک در ابتدای سال نباید کمتر از انرژی اولیه آن باشد. این قید تضمین‌گر آن است که محاسبات قابلیت اطمینان برای بدترین وضع ممکن انجام می‌شوند. $N_{TR}(\max)$ حداکثر ظرفیت ترانس توزیع می‌باشد. در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) جهت بهینه‌سازی استفاده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبکه هوشمند

در این بخش تعیین ظرفیت بهینه سیستم ریزشبکه‌های هوشمند مدل شده محاسبه می‌شود. سیستم فوق با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی شده است. برای این منظور نرم‌افزاری تحت محیط برنامه‌نویسی MATLAB آماده شده است. داده‌های سیستم شامل اطلاعات تابش و وزش سالیانه مربوط به شهرک اکباتان بوده که با دقت یک نمونه بر یک ساعت دقیقه برداشت شده‌اند. منحنی بار مصرف شهرک اکباتان برای هر فاز از شبکه توزیع دریافت گردیده است. منحنی‌های تابش خورشید، سرعت باد و منحنی بار نرمالیزه شده به صورت ساعتی به ترتیب در شکل‌های (۴) - (۶) نمایش داده شده‌اند. منحنی بار پایه بر اساس منحنی استاندارد IEEE در نظر گرفته شده است [۳۱]. قابل ذکر است جدول (۱) نیز شامل مشخصات نامی تجهیزات سیستم است که مدل آن‌ها در فصل گذشته تشریح شده است. برخی دیگر از ورودی‌های برنامه در جدول (۲) آورده شده‌اند. هزینه قطع بار نیز در حالت پایه با $5/6$ US\$/kWh در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: شدت تابش خورشید در شهرک اکباتان برای مدت یک سال

تعداد توربین‌های بادی، تعداد آرایه‌های خورشیدی، میکرو توربین، باتری و مبدل DC/AC می‌باشد. هزینه‌های سیستم شامل ارزش خالص فعلی (NPC) سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، سوخت و جایگزینی تجهیزات به اضافه هزینه‌های ناشی از وقفه در تامین بار در طول عمر ۲۰ ساله سیستم، هزینه تجهیزات هوشمند، تشویق‌های مالی جهت شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و هزینه خرید و فروش برق با شبکه توزیع می‌باشد. قید مساله نیز بیشینه مجاز برای شاخص قابلیت اطمینان ELF است. البته، شبیه‌سازی سیستم نیز دارای قیودی مانند رعایت بیشینه و کمینه توان و انرژی تولیدی تجهیزات می‌باشد. هزینه خالص فعلی تجهیز i را می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$NPC_i = N_i \times (CC_i + RC_i \times K_i + O \& MC_i \times PWA(ir, R)) \quad (25)$$

در عبارت فوق، N تعداد (unit) یا ظرفیت (kg یا kW) تجهیز، CC هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\$/unit)، RC هزینه هر بار جایگزینی (\$/unit)، $O \& MC$ و هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (US\$/unit) تجهیزات بوده و R نیز طول عمر پروژه (در این مطالعه ۲۰ سال) می‌باشد. ir بهره واقعی^{۱۳} که در این مطالعه ۶ درصد در نظر گرفته شده است.

PWA و K نیز به ترتیب فاکتور ارزش فعلی پرداخت‌های سالیانه^{۱۴} و ثابت^{۱۵} بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$PWA(ir, R) = \frac{(1 + ir)^R - 1}{ir(1 + ir)^R} \quad (26)$$

$$K_i = \sum_{n=1}^{N_i} \frac{1}{(1 + ir)^{n \times L_i}} \quad (27)$$

γ و L به ترتیب تعداد جایگزینی‌ها و طول عمر مفید تجهیز مربوطه می‌باشند. هزینه از دست رفتن بار را می‌توان طبق رابطه زیر بدست آورد:

$$Cost_{shedd} = LOEE \times C_{shedd} \quad (28)$$

که C_{shedd} برابر است با متوسط ضرر ناشی از قطع هر کیلووات ساعت بار مصرفی (US\$/kWh).

تابع هدف مساله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$OF_{ sizing} = Min \left\{ \sum_i \sum_{j=1}^{N_{max}} NPC_{i,j} + \sum_{j=1}^{N_{max}} Cost_{shedd,j} + NPC_{Trans} + \sum_n NPC_{SA,n} + \sum_n NPC_{incentive,n} + \sum_{j=1}^{N_{max}} Cost_{buy,j} - \sum_{j=1}^{N_{max}} Cost_{sell,j} \right\} \quad (29)$$

در عبارت فوق، i نشان‌دهنده اجزای ریزشبکه هوشمند مورد نظر بوده، و N_{year} مدت زمان پروژه بر حسب سال که $NPC_{SA,n}$ ارزش خالص فعلی هزینه مازاد سرمایه‌گذاری تجهیز هوشمند n ام می‌باشد. $\sum NPC_{Trans}$ ارزش خالص فعلی هزینه ترانس توزیع بوده و $NPC_{incentive,n}$ ارزش خالص فعلی تشویق مالی تجهیز هوشمند n ام است. NPC_{buy} و NPC_{sell} ارزش خالص فعلی خرید انرژی از شبکه و فروش انرژی به شبکه می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Cost_{buy} = \sum_{t=1}^{8760} P_{buy}(t) \times Price_{buy}(t) \quad (30)$$

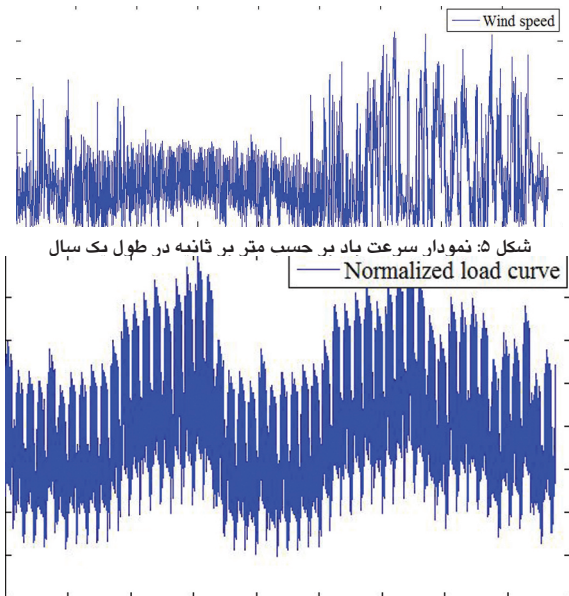
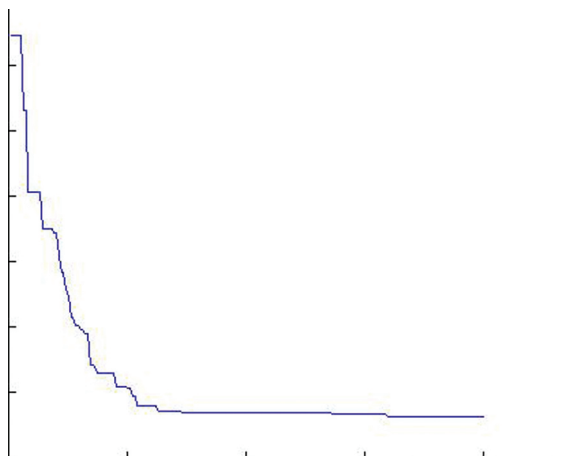
$$Cost_{sell} = \sum_{t=1}^{8760} P_{sell}(t) \times Price_{sell}(t) \quad (31)$$

که $P_{buy}(t)$ میزان توان خریداری شده از شبکه توزیع در ساعت

جدول ۴: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزش شبکه هوشمند

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۲/۹۶	۰/۰۰۸۸۱۵	۵۷/۳۷۲۶	۰/۰۰۸۳۶

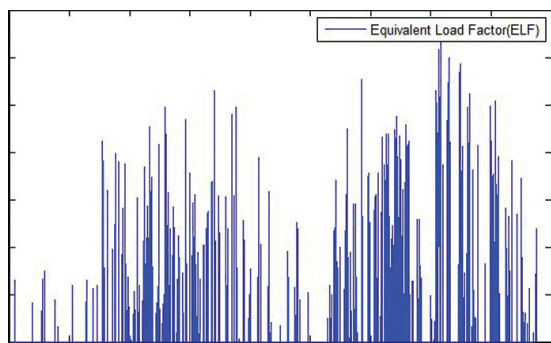
که در آن N_{Wind} تعداد بهینه واحدهای توربین بادی، N_{PV} تعداد بهینه پانل‌های خورشیدی، N_{MT} ظرفیت بهینه میکروتوربین، N_{bat} ظرفیت بهینه باتری است.



شکل ۵: نمودار سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در طول یک سال

شکل ۶: منحنی بار نرمالیزه سالیانه

شکل ۷: منحنی همگرایی الگوریتم PSO



شکل ۸: مقدار ساعت به ساعت ELF

شکل (۸) ضریب قطع معادل (ELF) ریزش شبکه هوشمند را نمایش می‌دهد. از آنجا که در ساعات ۲۰۰۰-۳۰۰۰ بار حداکثر بوده و مطابق با شکل (۵) سرعت باد نیز در این بازه زمانی کم می‌باشد لذا در این ساعات ضریب قطع معادل قابل توجه است. همچنین در ساعات ۶۰۰۰-۷۰۰۰ که پیک دیگر بار است مقادیر ضریب قطع معادل بزرگ می‌باشد.

برای مقایسه دقت روش تقریبی با روش دقیق، مدل تقریبی سیستم ریزش شبکه هوشمند به ازای ترکیب بهینه بدست آمده از روش دقیق اجرا شده و جواب‌های زیر بدست می‌آید. زمان لازم برای یک بار اجرای مدل تقریبی در این حالت حدود ۰/۲۳ زمان لازم برای اجرای مدل دقیق سیستم است. بدین ترتیب میتوان انتظار داشت که در صورت استفاده از مدل تقریبی جهت بهینه‌سازی سیستم، زمان لازم از ۴۰ ساعت به حدود ۹ ساعت کاهش پیدا کند که کاهش قابل توجهی می‌باشد. نتایج بدست آمده نیز در جدول (۵) نمایش داده شده‌اند که مقایسه آن با نتایج موجود در جدول (۴) نشان دهنده دقت مناسب روش تقریبی پیشنهادی است. ذکر این نکته نیز لازم است که هزینه خالص فعلی سیستم و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آن وابسته به ترکیب سیستم بوده و تفاوتی بین مقادیر بدست آمده برای آنها از روش

جدول ۱: مشخصات نامی تجهیزات مورد استفاده در ریزش شبکه‌های مورد بررسی

تجهیز	هزینه اولیه (US\$/unit)	هزینه جاری (US\$/unit)	نگهداری سالیانه (US\$/unit-yr)	عمر مفید (سال)	بازدهی (درصد)	دسترسی (درصد)
توربین بادی	۷۵۰۰۰	۴۰۰۰	۷۵۰	۲۰	-	۹۶
آرایه خورشیدی	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰	۲۰	-	۹۶
میدل	۸۰۰	۷۵۰	۸	۱۵	۹۰	۹۹/۸۹
میکروتوربین	۴۰۰	۳۴۰	۲۰	۵	۳۰	۱۰۰
باتری	۵۰۰	۴۰۰	۲۵	۳	۸۵	۱۰۰

جدول ۲: دیگر داده‌های ورودی برنامه

ردیف	ورودی	مقادیر
۱	قیمت سوخت (\$/Mbtu)	۰/۱۲
۲	نرخ تورم	۰/۰۶
۳	عمر پروژه (سال)	۲۰
۴	تعداد جمعیت	۳۰
۵	تعداد تکرار	۲۰۰
۶	ELF_{max}	۰/۰۱

نتایج تعیین ظرفیت اجزای ریزش شبکه هوشمند در جدول (۳) و شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. در جدول (۴) شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزش شبکه هوشمند نشان داده شده است. قابل ذکر است که در این حالت پاسخ گویی بار و رشد بار لحاظ نشده است. زمان لازم برای یک بار اجرای محاسبات بهینه‌سازی حدود ۴۰ ساعت بوده که به نسبت طولانی می‌باشد.

جدول ۳: نتایج تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزش شبکه هوشمند

هزینه ریزش شبکه (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}
۸/۱۷۷۷*۱۰ ^۷	۲/۲۵*۱۰ ^۳	۲۰۵۰	۱۰۵۰۰	۳۷۸۰	۸۷

جدول ۶: نتایج تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبهک هوشمند با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱

هزینه ریزشبهک (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸۳۱۳۲*۱۰ ^۷	۳/۱۲*۱۰ ^۳	۱۰۴۷	۱۰۶۲۱	۳۸۱۵	۹۱	ریزشبهک هوشمند

جدول ۷: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبهک هوشمند با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱/۱	۰/۰۰۱۱	۶/۱۱۳۴	۰/۰۰۱۱

اصولاً دو راه برای بهبود قابلیت اطمینان یک سیستم وجود دارد، نخست استفاده از عناصری با قابلیت اطمینان بالاتر، و دوم تغییر ساختار سیستم. در اینجا نیز، یک راه بسیار ساده برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد مطالعه، استفاده از دو میدل DC/AC به‌طور موازی است که در این وضعیت حد پایین ضریب قطع معادل تا ۰/۰۰۰۰۰۱۲۱ کاهش می‌یابد. برای مشاهده کارایی روش نخست نیز، بهینه‌سازی سیستم با فرض در دسترس بودن تمام اجزای آن انجام شده و نتایج زیر بدست می‌آید (جدول (۸) و (۹)).

جدول ۸: تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبهک هوشمند با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱ و عدم خروج اجزا

هزینه ریزشبهک (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۱۱۴۳*۱۰ ^۷	۳/۱۴*۱۰ ^۳	۲۰۲۴	۱۰۲۳۰	۳۶۵۰	۸۷	ریزشبهک هوشمند

جدول ۹: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبهک هوشمند با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱ و عدم خروج اجزا

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۰/۲	۰/۰۰۰۱۵۷	۰/۰۷۴۳	۰/۰۰۰۱

۱-۲-۲- بهینه‌سازی بدون قید قابلیت اطمینان

ضرر ناشی از قطع هر کیلووات ساعت برق برای مشترکان خانگی چیزی حدود ۲ تا ۱۲ US\$، و برای مشترکان صنعتی بین ۵ تا ۴۰ US\$ بوده که به‌طور متوسط برابر با ۵/۶ US\$ در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت، هدف از این بخش پیدا کردن نقطه سربه‌سر^{۱۷} هزینه‌های تولید و هزینه‌های عدم تامین بار خواهد بود. انتظار می‌رود که در این نقطه هزینه نهایی^{۱۸} تولید انرژی با متوسط هزینه از دست رفتن بار برابر شود.

برای داشتن درک بهتری از هزینه‌های تامین بار، ترکیب بهینه سیستم بدون در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان، به ازای هزینه از دست رفتن بار ۲ و ۱۲ US\$/kWh (به ترتیب برابر با کمینه و بیشینه هزینه از دست رفتن انرژی برای مشترکان خانگی) محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده در جدول‌های (۱۰) تا (۱۳) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱۰: ترکیب بهینه سیستم بدون قید قابلیت اطمینان ($C_{loss} = 2US$/kWh$)

هزینه ریزشبهک (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۱۴۲۱*۱۰ ^۷	۲/۲۱*۱۰ ^۳	۱۸۷۹	۱۰۲۷۵	۳۵۶۳	۸۷	ریزشبهک هوشمند

دقیق و روش تقریبی وجود ندارد. در واقع تفاوت مدل تقریبی سیستم با مدل دقیق آن تنها در محاسبات قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد.

جدول ۵: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبهک هوشمند

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۲/۱۷	۰/۰۰۸۷۴۲	۵۶/۱۲۵۳	۰/۰۰۸۲۸

نکته جالبی که در جدول (۵) به چشم می‌خورد، مقدار ضریب قطع معادل (ELF) بدست آمده در نقطه بهینه می‌باشد. همان‌طور که پیشتر ذکر گردید، قسمتی از تابع هدف تعریف شده با رابطه (۲۸) نشان‌دهنده عدم رضایت و یا زیان وارد شده به مشترکین در اثر قطع بارشان می‌باشد. علاوه بر تابع هدف، قید (۳۲) نیز بر میزان بار قطع شده اثر گذاشته و میزان آن را محدود می‌کند، در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم در سطح مطلوبی حفظ می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، که در جدول (۵) نیز نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که در نقطه بهینه، قید قابلیت اطمینان سیستم فعال نمی‌شود. در واقع، به علت بالا بودن هزینه‌های از دست رفتن بار در مقایسه با هزینه‌های بهبود قابلیت اطمینان سیستم، افزایش هزینه‌های ساخت، جایگزینی و تعمیر و نگهداری سیستم (در واقع طراحی سیستمی گران‌تر) از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد.

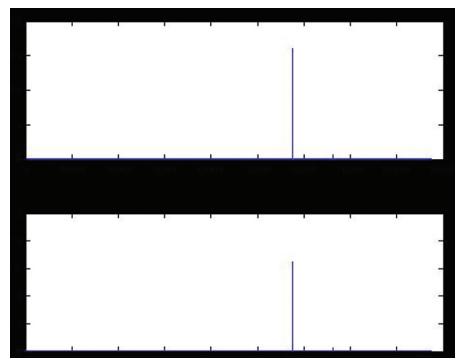
۱-۶- آنالیز حساسیت نسبت به قید قابلیت اطمینان

در این بخش حساسیت سیستم ریزشبهک هوشمند نسبت به این قید ELF بررسی خواهد شد.

۱-۶-۱- قید ضریب قطع بار ۰/۰۰۰۱

قید ضریب قطع معادل برابر با ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده و برنامه اجرا می‌شود، نتایج بدست آمده در جدول‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. علاوه بر افزایش هزینه‌های سیستم نسبت به حالت پایه، مشاهده می‌شود که ELF به دست آمده برابر با ۰/۰۰۱۱ می‌باشد که قید مورد نظر را ارضا نمی‌کند! البته این امر بسیار منطقی بوده و به سادگی قابل توجیه می‌باشد.

مشاهده گردید که، احتمال دسترسی میدل DC/AC برابر با ۰/۹۹۸۹ است. از طرف دیگر، میدل DC/AC بصورت سری با بار قرار گرفته است. با توجه به تئوری قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان یک سیستم متشکل از عناصر سری برابر با حاصل ضرب قابلیت اطمینان تک‌تک عناصر آن می‌باشد. در نتیجه، قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی در این هیچگاه نمی‌تواند بیشتر از قابلیت اطمینان میدل DC/AC گردد. در واقع، کمینه ضریب قطع بار ممکن این سیستم برابر با نرخ خروج میدل، یعنی ۰/۰۰۱۱ خواهد بود. در شکل (۹) شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم در طول سال (با قید ضریب قطع بار معادل ۰/۰۰۰۱) نشان داده شده است.



شکل ۹: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبهک هوشمند در طول سال (با قید ضریب قطع بار معادل ۰/۰۰۰۱)

سیستم کمتر شده و در صورت تامین همه بار سیستم (سیستم ۱۰۰ درصد قابل اطمینان)، این دو مقدار با یکدیگر برابر می‌شوند که البته این امر نیز منطقی می‌باشد. در واقع تحت شرایطی که افزایش قابلیت اطمینان سیستم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد، هزینه انجام شده جهت بهبود قابلیت اطمینان سیستم از ارزش بار تامین بیشتر می‌شود، در نتیجه متوسط هزینه تولید انرژی سیستم افزایش می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Exponent law
- 2 Loss of Load Expectation
- 3 Loss of Energy Expectation
- 4 Expected Energy Not Supplied
- 5 Loss of Power Supply Probability
- 6 Equivalent Loss Factor
- 7 Forced Outage Rate
- 8 Mean Time To Failure
- 9 Failure rate
- 10 Mean Time To Repair
- 11 Availability
- 12 Net Present Value
- 13 Real interest rate
- 14 Annual Payment Present Worth
- 15 Single payment present worth
- 16 Particle swarm optimization (PSO)
- 17 Break-even point
- 18 Marginal cost

مراجع

- [1] D. N. Lut, A. K. Raji, Optimal sizing of hybrid fuel cell-super-capacitor storage system for off-grid renewable applications, Energy, Pages 530-540, 2019.
- [2] G. Human, G.v. Schoor, K.R. Uren, Power management and sizing optimisation of renewable energy hydrogen production systems, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Pages 155-166, 2019.
- [3] I. Padrón, D. Avila, G. N. Marichal, J. A. Rodríguez, Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pages 221-230, 2019.
- [4] J.L. Duchaud, G. Notton, C. Darras, C. Voyant, Multi-Objective Particle Swarm optimal sizing of a renewable hybrid power plant with storage, Renewable Energy, Pages 1156-1167, 2019.
- [5] FS. Abu-Mouti, ME. El-Hawary, Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm, IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 26, Pages 2090-2101, 2011.
- [6] S. Bahramirad, H. Daneshi, Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Pages 1-7, 2012.
- [7] Z. Iverson, A. Achuthan, P. Marzocca, D. Aidun, Optimal design of hybrid renewable energy systems (HRES) using hydrogen storage technology for data center applications, Renewable Energy, Vol. 52, Pages 79-87, 2013.
- [8] J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by hybrid system using fuel cell, PV, and battery, Renewable Energy, Vol. 34, Pages 683-691, 2009.
- [9] C-H. Li, X-J. Zhu, S. Sui S, M-R. Hu, Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology, Renewable Energy, Vol. 34, Pages 815-826, 2009.
- [10] A. Mellit, SA. Kalogirou, M. Drif, Application of neural net-

۳۴ ادامه در صفحه

جدول ۱۱: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشیکه هوشمند ($C_{loss} = 2US\$/kWh$)

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱۲/۴۲	۰/۰۲۵۱۷	۱۶۱/۷۷۵۳	۰/۰۲۲۱۶

جدول ۱۲: ترکیب بهینه سیستم بدون قید قابلیت اطمینان ($C_{loss} = 12US\$/kWh$)

هزینه ریزشیکه (\$)	تلفات (kWh)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	ریزشیکه هوشمند
۸/۱۹۱۲*۱۰ ^۷	۲/۲۷*۱۰ ^۳	۲۰۷۴	۱۰۵۲۰	۳۷۸۰	۸۹	

جدول ۱۳: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشیکه هوشمند ($C_{loss} = 12US\$/kWh$)

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱/۰۸	۰/۰۰۱۸۱۷	۶/۳۷۲	۰/۰۰۱۵۷۴

چنان‌که مشاهده می‌شود در صورت برابر بودن هزینه از دست رفتن بار با $2US\$/kWh$ ، تامین حدود ۹۷/۵ درصد از بار سیستم توجیه‌پذیر است. در حالی‌که با رسیدن هزینه از دست رفتن بار به $12US\$/kWh$ ، این مقدار به بیش از ۹۹/۸ درصد می‌رسد. جدول (۱۴)، نتایج مقایسه انجام شده بین متوسط هزینه‌های سیستم را نشان می‌دهد. در این جدول منظور از هزینه متوسط تولید انرژی، نسبت بین هزینه‌های انجام شده جهت تولید انرژی به کل بار تامین شده می‌باشد. منظور از هزینه متوسط سیستم نیز نسبت بین مجموع هزینه‌های تولید انرژی و عدم‌تامین بار به کل بار سیستم می‌باشد.

جدول ۱۴: متوسط هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم

ELF	هزینه متوسط تولید انرژی (US\$/kWh)	هزینه متوسط سیستم (US\$/kWh)	هزینه از دست رفتن بار (US\$/kWh)	ELF_{max}
۰/۰۲۲۱۶	۰/۴۴۰۹	۰/۴۵۷۴	۲	۱
۰/۰۰۸۸۳۶	۰/۴۶۰۰	۰/۴۸۳۸	۵/۶	۱
۰/۰۰۱۵۷۴	۰/۴۸۳۷	۰/۴۹۵۲	۱۲	۱
۰/۰۰۱۱	۰/۵۰۰۳	۰/۵۰۳۲	۵/۶	۰/۰۰۰۱

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتم PSO برای اندازه‌یابی بهینه یک سیستم میکروشبکه هوشمند، متشکل از واحدهای تولیدکننده توربین بادی و آرایه خورشیدی، میکروتوربین و سیستم ذخیره‌سازی باتری استفاده می‌شود. داده‌های وزش و تابش مورد استفاده مربوط به نواحی شمال غرب ایران می‌باشد. هدف از بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه‌های سیستم طی یک دوره کارکرد ۲۰ ساله با در نظر گرفتن قیود فنی و قابلیت اطمینان می‌باشد. با توجه به پیچیدگی و بزرگی سیستم مورد مطالعه، انجام محاسبات قابلیت اطمینان آن بسیار طولانی و وقت‌گیر می‌باشد. در این مقاله یک مدل تقریبی برای انجام محاسبات قابلیت اطمینان سیستم پیشنهاد شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به‌کارگیری این روش در عین داشتن دقت بالا، باعث کاهش چشمگیر در زمان و حجم محاسبات می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قابلیت اطمینان سیستم و یا افزایش هزینه بار از دست رفته، بر متوسط هزینه‌های سیستم افزوده می‌شود که با توجه به شرایط فرض در این مقاله این امر منطقی می‌باشد. نکته دیگر آن‌که در نقطه سربه‌سر اقتصادی متوسط هزینه سیستم از متوسط هزینه تولید انرژی بیشتر است. همچنین، در صورت محدود شدن شرایط سیستم، در اثر اعمال قید قابلیت اطمینان، اختلاف بین متوسط هزینه تولید انرژی و متوسط هزینه

- works and genetic algorithms for sizing of photovoltaic systems. Renewable Energy, Vol. 35, Pages 2881-2893, 2010.
- [11] AB. Kanase-Patil, RP. Saini, MP. Sharma, Integrated renewable energy for off grid rural electrification of remote area, Renewable Energy, Vol. 35, Pages 1342-1349, 2010.
- [12] FO. Hocaoglu, ON. Gerek, M.A. Kurban, novel hybrid (wind-photovoltaic) system sizing procedure, Solar Energy, Vol. 83, Pages 2019-2028, 2009.
- [13] ES. Sreeraj, K. Chatterjee, S. Bandyopadhyay, Design of isolated renewable hybrid power systems. Solar Energy, Vol. 84, Pages 1124-1136, 2010.
- [14] BE. Turkey, AY. Telli, Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems, Renewable Energy, Vol. 36, Pages 1931-1943, 2011.
- [15] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system, Solar Energy, Vol. 85, Pages 2407-2420, 2011.
- [16] BO. Bilal, V. Sambou, PA. Ndiaye, CMF. Kebe, M. Ndong, Optimal design of hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP). Renewable Energy, Vol. 35, Pages 2388-2390, 2010.
- [17] A. Kashefi Kaviani, H.R. Baghaee, G.H. Riahy, Design and Optimal Sizing of a Photovoltaic/Wind-generator System Using Particle Swarm Optimization, Proceedings of the 22nd Power System Conference (PSC), 2007.
- [18] <http://www.yinglisolar.com>. Available at: 2018/12/10.
- [19] R. Karki, R. Billinton, Reliability/cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, Pages 368-373, 2001.
- [20] <http://www.windpowercn.com/products/11.html>. Available at: 2019/1/15.
- [21] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley, ISBN 0-471-28060-7, 2004.
- [22] R.S. Garcia, D. Weisser, A Wind-diesel System with Hydrogen Storage: Joint Optimization of Design and Dispatch, Renewable Energy, Vol. 31, Pages 2296-2320, 2006.
- [23] Bagen, R. Billinton, Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-alone Power Systems, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, Pages 654-660, 2005.
- [24] R. Billinton, R.N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd edition, Plenum Press, New York, 1992.
- [25] M. Marchesoni, S. Savio, Reliability Analysis of a Fuel Cell Electric City Car, European Conference on Power Electronics and Applications, Page10, 2005.
- [26] M.K. Khairil, S. Javanovic, Reliability Modeling of Uninterruptible Power Supply Systems using Fault Tree Analysis Method, European Transaction on Electrical Power, Vol. 19, Pages 258-273, 2007.
- [27] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis, Methodology for Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic/Wind-generator Systems using Genetic Algorithms, Solar Energy, Vol. 80, Pages 1072-1088, 2006.
- [28] K. Strunz, E.K. Brock, Stochastic Energy Source Access Management: Infrastructure-integrative Modular Plant for Sustainable Hydrogen-electric Co-generation, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, Pages 1129-1141, 2006.
- [29] D. Menniti, A. Pinnarelli, A Method To Improve Micro grid Reliability By Optimal Sizing PV/WIND Plants And Storage Systems, 20th International Conference on Electricity Distribution, Page 1, 2009.
- [30] M. Tanrioven, M.S. Alam, Reliability Modeling and Analysis of Stand-alone PEM Fuel Cell Power Plants, Renewable Energy, Vol. 31, Pages 915-933, 2006.
- [31] V. P.Gountis, A. G.Bakirtis, Efficient Determination of Cournot Equilibria in Electricity Markets, IEEE transaction on power system, Vol. 19, Pages 1837-1844, 2004.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن طراحی و ساخت یک دستگاه اولتراسونیک هموزنایزر، به بهبود نقاط ضعف دستگاه‌های مشابه در پژوهش‌های قبلی برای بومی‌سازی دستگاه بهینه در ایران پرداخته شد. در این ساختار، به پیاده‌سازی راه‌کارهایی برای مقاومت بیشتر دستگاه در برابر اثرات حرارتی افزایش توان پرداخته شد. با تعبیه یک رابط در این دستگاه، امکان تعامل گرافیکی با کاربران نیز مهیا گردیده است. همچنین قابلیت‌های بیشتری مانند سنسور دما و فن خنک‌کننده نیز نسبت به دستگاه‌های مشابه اضافه شد که در صورت رسیدن دستگاه به یک دمای معین، ادامه کار آن را متوقف می‌سازد. فرکانس در دستگاه‌های مشابه خارجی ۲۴ و ۲۶ کیلوهرتز است، که در دستگاه پیشنهادی به جهت مقابله با گرمای ناشی از افزایش فرکانس، به ۲۰ کیلوهرتز کاهش داده شده است. این درحالی است که توان در دستگاه پیشنهادی از ۴۰۰ وات در نمونه خارجی به ۶۰۰ وات افزایش یافته است. حجم مایع همگن شده برای بهترین دستگاه خارجی موجود در بازار، ۲۰۰ لیتر در روز بوده در حالیکه برای دستگاه پیشنهادی به ۳۰۰ لیتر در روز افزایش یافته است.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Homogenization
- 2 Suspension
- 3 Emulsion
- 4 Ultrasonic Homogenizer
- 5 Cavitation
- 6 Phase Locked Loop
- 7 Transducer
- 8 Resonator
- 9 Probe
- 10 Human Machine Interface(HMI)
- 11 Pulse-width modulation
- 12 Duty Cycle
- 13 Power Supply
- 14 Voltage-controlled oscillator
- 15 Inductance
- 16 dynamic voltage restorer (DVR)
- 17 Negative Temperature Coefficient (NTC)
- 18 Sensor
- 19 Sonotrode

مراجع

- [1] E. Ensminger, D. Stulen, Ultrasonics: data, equations and their practical uses. CRC Press, pp. 150-151, 2008.
- [2] H. Barraza, D. Toro-Sanchez, R. Cruz, "Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins" Elsevier Trans. Ultrasonics sonochemistry, Vol. 31, No. 1, pp. 558-562, 2016.
- [3] P. Paquin "Technological properties of high pressure homogenizers: the effect of fat globules, milk proteins, and polysaccharides", Int. Dairy Journal, Vol. 9. No.3: pp. 329-335.1999.
- [4] P. Dhankhar, "Homogenization Fundamentals," IOSR Journal of Engineering, Vol. 04, No. 05, pp. 01-08, 2014.
- [5] G. Pollet, "Let's not ignore the ultrasonic effects on the preparation of fuel cell materials homogenization Fundamentals," SPRINGER Trans. Electro catalysis, Vol. 5, No. 4, pp. 330-343, 2014.
- [6] J. Wang, "Ultrasonic Machining," intechopen.75170 Open access peer-reviewed chapter, 2018.
- [7] D. Ensminger, L. J. Bond, "Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications", CRC Press, pp. 10-12, 2011.
- [8] H.M. Shertukle, Distributed Photovoltaic Grid Transformers. CRC press, pp. 10-12, 2017.
- [9] http://www.imlab.com/hielscher/UP400St_SPEC_HIELSCHER_IMLAB_eng.pdf
- [10] R. Ranjbarzadeh, "Preparing and Investigation a New Nanofluid for Employing in Machining Process: Synthesis and Characterization of Graphene Oxide Nanoparticles", Journal of Advanced Materials and Processing, Vol. 5, No. 4, pp. 3-11, 2017.
- [11] <http://www.maneko.cz/data/Hielscher/UP200Ht.pdf>
- [12] P. Daniella, A. Fabiano-Tixier, and F. Chemat. "An improved ultrasound Clevenger for extraction of essential oils." Food Analytical Methods, pp. 91-95, 2014.
