

بررسی یک ریزشبه با تولید پراکنده در سیستم قدرت با اعمال قابلیت اطمینان

"مصطفی زلّقی" حسین توپچی زاده^۲

^۱ برق منطقه ای خوزستان، امور بهره برداری، ناحیه شمالشرق، شوشتر، ایران، mostafazallaghi@gmail.com

^۲ برق منطقه ای خوزستان، امور بهره برداری، ناحیه شمالشرق، شوشتر، ایران، hosseintoopchizade@gmail.com

چکیده: به سبب افزایش ناگهانی در تقاضای تامین توان مطمئن با حداقل تعداد دفعات و حداقل زمان خاموشی، ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت یک موضوع مهم در بخش قدرت هم برای مصرف‌کننده و هم برای شبکه می‌باشد. این امر موجب شده است تا شبکه از منابع انرژی تجدیدپذیر (RER) در دسترس به عنوان یک معیار برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت و هم چنین کاهش وابستگی بیش از حد به منابع سوخت فسیلی استفاده کند. استفاده از تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر در سیستم توزیع شعاعی، سیستم قدرت تک منبعی را به سیستم قدرت دوطرفه با چندین منبع تبدیل کرده است. این امر قابلیت اطمینان شبکه توزیع شعاعی را افزایش می‌دهد و همچنین خاموشی‌های آن را کاهش می‌دهد. در این تحقیق، ژنراتور توربین بادی (WTG)، فتولتائیک (PV) و سیستم ذخیره باتری (BSS) با هدف بهبود قابلیت اطمینان ریزشبه‌های موجود در سیستم قدرت و کاهش هزینه انرژی (COE) و هزینه سالیانه سیستم (ACS) مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف تحقیق با استفاده از هزینه خاموشی سالیانه (TOC)، هزینه آلودگی سالیانه (AEC)، هزینه جایگزینی سالیانه (ARC) و مجموع هزینه کنونی (NPC) مربوط به سیستم قدرت تکمیل شده است. روش پیشنهادی بر سیستم تست Roy Billinton (RBTS) اصلاح یافته اعمال می‌شود تا این واقعیت که RER می‌تواند برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش COE و ACE سیستم استفاده شود را تایید کند. یک آنالیز جامع از RER نیز با بررسی اثرات نرخ سود بر COE، NPC و ACS سیستم قدرت اجرا شده است.

کلمات کلیدی: آلودگی، ریزشبه، سیستم بادی، منابع انرژی تجدیدپذیر، قابلیت اطمینان

۱. مقدمه

وابسته به قابلیت اطمینان سیستم قدرت آن بوده چرا که سهم بزرگ-تری از بخش مالی به این نوع از انرژی وابسته بوده تا فعالیت‌های اقتصادی آنها را افزایش دهد [۳-۵].

توسط سازمان‌های بین المللی مختلف گزارش شده است که حدود ۱۷٪ جمعیت کل بدون تامین توان الکتریکی زندگی می‌کنند [۶].

ورود RER ها به سیستم قدرت، توجه قابل توجه جهانی وسیعی را به دلیل اثرات قابل توجه آن مانند بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت و کاهش هزینه سوخت، هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری (O & M) و هزینه آلودگی به خود جلب کرده است [۷]. این مشخصه یکتا، بسیاری از کاربردهای قدرتی در جهان را به منظور تشویق استفاده از RER ها به عنوان یک مقیاس تسهیل کرده است تا تولید توان الکتریکی کل را افزایش دهد. افزایش ناگهانی در تقاضای توان و نگرانی‌های عمومی حول اثرات محیطی استفاده از سوخت فسیلی برای تولید توان، آگاهی‌های کلی برای استفاده از RER ها را به وجود آورده است. منابع بادی و خورشیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر بالقوه می‌باشند که به دلیل مزایای تکنیکی و اقتصادی شان توجه جهانی را به خود معطوف کرده اند [۸]. راه حل‌های بالقوه دیگر برای کاهش آلودگی گازهای گلخانه‌ای (GHG) و کاهش تغییرات آب و هوایی، اپراتورهای شبکه توزیع را تشویق کرده است تا منابع بادی و خورشیدی را برای کاربردهای تولید توان به کار گیرند. این موضوع مطرح شده توسط مشخصه تصادفی سیستم‌های بادی و خورشیدی

نرخ بالای مصرف انرژی جهانی به دلیل افزایش جمعیت و توسعه اقتصاد جهانی وابسته به صنعتی شدن سریع، سرمایه زیادی را برای تامین قدرت مطمئن نیاز دارد. با بازسازی سیستم قدرت جهانی، افزایش سریع تقاضای توان، نگرانی‌های مربوط به تغییرات آب و هوایی، قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و کاهش منابع سوخت فسیلی، RER ها نقش بسیاری مهمی در توسعه انرژی پایدار به سبب مشخصه پایان ناپذیر و عدم آلودگی‌شان ایفا می‌کنند [۱]. این مشخصات ظرفیت نصب شده کلی تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر را افزایش داده است. وظیفه سیستم قدرت برآورده کردن تقاضای توان مصرف‌کننده‌های متعدد به صورت اقتصادی و موثر با اثبات سطح کافی از کیفیت و قابلیت اطمینان می‌باشد [۲]. برای برآورده کردن این هدف، چندین کشور در جهان احتمال ورود RER ها در سیستم قدرتشان را در نظر گرفته اند. تحقیقات اخیر انجام شده توسط انجمن انرژی جهانی (WEC) پیش بینی کرده اند که خروجی توان RER ها از مقدار کنونی ۲۳/۷٪ تا حدود ۳۴٪ در سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. تقاضای توان به سبب افزایش جمعیت، صنعتی شدن و استانداردهای بالای زندگی به صورت روزانه افزایش می‌یابد. به همین سبب، به دلیل نقشی که سیستم الکتریکی در افزایش اقتصاد، توسعه و سلامت اجتماعی یک ملت ایفا می‌کند، نیاز به سیستم قدرت مطمئن همیشه بسیار مهم بوده است. توسعه اقتصادی یک ملت کاملاً

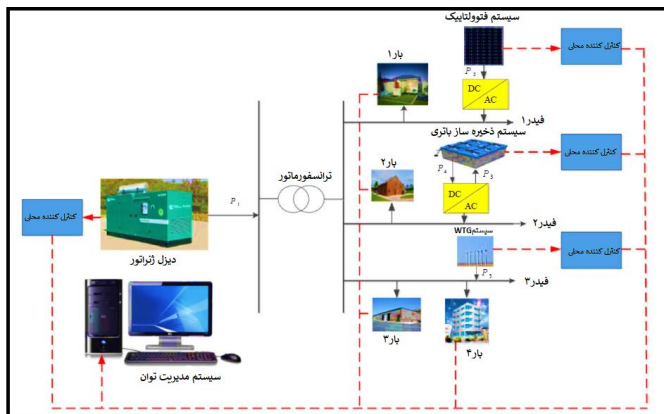
می‌تواند تا حد خاصی با به کارگیری منابع توان مختلف در سیستم قدرت کاهش یابد [۹].

چندین روش برای بررسی اثرات RER و BSS بر روی آنالیزهای اقتصادی و قابلیت اطمینان سیستم قدرت پیشنهاد شده است. Hussain و همکاران [۱۱] یک روش انتخاب فیلتر تکراری برای ارزیابی مزایای استفاده از آرایه های PV، WTG و BSS در یک سیستم قدرت ترکیبی ارائه کرده‌اند. این امر با در نظر گرفتن یک وضعیت که در آن برخی از قیود بر روی سیستم ترکیبی برای بهبود قابلیت اطمینان و کمینه سازی هزینه های کل پروژه و توان مازاد استفاده نشده تحمیل می‌شود، به دست آمده است. خالدیان و همکاران [۱۲] الگوریتم بهینه سازی ذرات (PSO) را استفاده کرده اند تا هزینه‌های بهره برداری و هزینه‌های آلودگی سیستم قدرت ریزشبه را کمینه کند. اثرات RER نیز بر روی انحراف فرکانس سیستم قدرت بررسی شده است. Govardhan و همکاران [۱۴] یک تکنیک تخصیص توان به واحدها (unit commitment) پیشنهاد دادند که تصمیم برای خاموش/روشن بودن واحدهای تولید متعدد برای اجرای کمترین هزینه تولید و همچنین برآورده کردن تقاضای توان مورد نیاز مصرف کننده، حاشیه رزرو توان و دیگر موارد ضروری مورد نیاز برای یک زمان برنامه ریزی شده را به دست می‌آورد.

Gonzalez و همکاران [۱۶] تعیین ابعاد بهینه شبکه متصل به سیستم ترکیبی که شامل سیستم های PV و بادی می‌شود را برای کمینه سازی هزینه طول عمر (LCC) سیستم اجرا کرده اند. آنالیز حساسیت سیستم نیز با بررسی متغیرهای ورودی که می‌تواند ساختار PV و بادی را تحت تاثیر قرار دهند، اجرا شده است. Ayodele و همکاران [۱۷] بررسی‌هایی بر قابلیت اجرای سیستم انرژی ترکیبی جزیره‌ای برای Ala-Ajagbasi، منطقه‌ای دور از دسترس در نیجریه، انجام داده‌اند. نتایج شبیه سازی اثبات کردند که سیستم ترکیبی بادی/دیزل/باتری مناسب ترین روش برای این شبکه است. Ramli و همکاران [۱۹] ارزیابی تکنیکی-اقتصادی سیستم قدرت ترکیبی بادی و خورشیدی را با استفاده از هزینه تولید انرژی و هزینه انرژی به عنوان یک معیار برای ارزیابی اثرات منابع بادی و خورشیدی در سیستم قدرت ترکیبی را انجام داده اند. به علاوه، Notton و همکاران [۲۰] پتانسیل منابع خورشیدی و بادی برای تولید توان در جزیره Corsica را ارزیابی کرده اند. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که سیستم قدرت ترکیبی PV/بادی/BSS یک کاربرد بالقوه تولید توان است که می‌تواند راه حل خوبی برای قابلیت اطمینان بالاتر برای مصرف کنندگان روستایی که در مناطق دور از دسترس سیستم قدرت زندگی می‌کنند، ارائه دهد.

۲- فرمول بندی

تابع هدف اصلی این تحقیق بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت و همچنین کمینه سازی ACS و COE همراه با ارضا کردن توان مورد نیاز مصرف کننده و قیود سیستم می باشد. ACS شامل AEC, AFC, AMC، هزینه جایگزینی سالیانه (ARC) و هزینه سرمایه سالیانه (ACC) سیستم می باشد. این امر می‌تواند با ورود واحدهای BSS و RER ها نظیر سیستم های WTG و PV به سیستم قدرت به دست آید که به موجب آن بار مورد نیاز مصرف کننده میان دیزل ژنراتور، BSS و RER ها تقسیم می‌شود. بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت و کمینه‌سازی COE و ACS سیستم در طراحی سیستم قدرت از مهمترین اهداف هستند. این پارامترهای عملکرد کلیدی در این تحقیق برای رسیدن به عملکرد بهینه سیستم قدرت ریزشبه پیشنهادی در نظر گرفته شده اند. این امر توسط محدود کردن کنترل متغیرهای دیزل ژنراتور و افزایش متغیرهای کنترلی RER ها در COE و ACS کاهش یافته انجام می‌شود. غیرخطی بودن الگوی منابع انرژی تجدیدپذیر، تقاضای بار و مصرف سوخت نیز در این تحقیق در نظر گرفته شده اند. تابع هدف شامل سه قسمت می‌شود: TOC، ACS و COE. ساختار سیستم قدرت ریزشبه پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: ساختار سیستم ریزشبه مورد مطالعه

تابع هدف سیستم قدرت ریاضی به طور ریاضی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = \min \sum_{i=1}^n (TOC + ACS + COE) \$ / yr$$

$$= \min \sum_{i=1}^n (ECOST + K_e) + (ACC + ARC + AMC + AFC + AEC) + COE \$ / yr \quad (1)$$

مولفه اول تابع هدف شاخص های قابلیت اطمینان نظیر ECOST و EENS را نشان می‌دهد که در معادله ۲ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$TOC = \sum_{i=1}^n (ECOST + K_e EENS) (\$ / yr) \quad (2)$$

۳-۱-۳- محدودۀ تعادل توان

مقدار مثبت تعادل توان عملکرد شارژ باتری را نشان می‌دهد و مقدار منفی عملکرد دشارژ باتری را نشان می‌دهد.

$$P_{balance} = \left[\sum_{z=1}^{N_D} P_D(z, t) - \left(\sum_{j=1}^{N_{pv}} P_r(j, t) + \sum_{n=1}^{N_{wtg}} P_\delta(n, t) \right) \right] \quad (11)$$

که در آن $P_1(i, t)$ توان تولیدی توسط دیزل ژنراتور، $P_2(j, t)$ توان تولیدی توسط سیستم PV، $P_3(n, t)$ توان شارژ در BSS، $P_4(m, t)$ توان دشارژ در BSS، $P_5(n, t)$ توان تولیدی توسط سیستم بادی، $P_D(z, t)$ تقاضای توان در نقاط بار مصرف کننده و N_{gen}, N_{PV}, N_{wtg} & N_{bss} نشان دهنده تعداد دیزل ژنراتورها، PV، WTG و BSS در طول مدت t می‌باشد. ND تعداد نقاط بار در ریزشکه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

تابع هدف اصلی این تحقیق با به کارگیری یک تابع fmincon که در معادله ۱۲ نشان داده شده است به دست می‌آید:

$$F = \min \sum_{i=1}^n f(x) \quad (12)$$

با داشتن قیود زیر:

$$C(x) \leq .$$

$$Ceq(x) = .$$

$$A.x \leq b$$

$$Aeq.x = beq$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (13)$$

که در آن $C(x)$ و $Ceq(x)$ توابعی هستند که بردارها را معکوس می‌کنند؛ ub, beq, b, x بردارها هستند، A و Aeq ماتریس بوده و $f(x)$ تابعی است که یک اسکالر را معکوس می‌کند، $C(x)$ ، $Ceq(x)$ توابع غیر هستند.

۳-۱-۲- انرژی مورد انتظار تامین نشده

انرژی مورد انتظار تامین نشده (EENS) کل انرژی است که باید در نقاط بار سیستم تحویل داده نشود. EENS قطعی انرژی مورد انتظار در دوره زمانی که تقاضای بار بیشتر از ظرفیت تولید موجود است، می‌باشد. این شاخص یک شاخص مهم بوده که توسط شبکه‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت استفاده می‌شود. ظرفیت تقاضای بار برآورده نشده می‌تواند بر حسب MWh در طول یک دوره زمانی خاص با شاخص EENS اندازه گیری شود. EENS سیستم توزیع مانند آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است می‌تواند با استفاده از معادله ریاضی زیر محاسبه شود:

که در آن k_e مقدار بار از دست رفته (\$/kWh)، EENS انرژی مورد انتظار تامین نشده (MWh/yr) و ECOST شاخص هزینه قطع مورد انتظار (\$/yr) می‌باشد.

المان دوم تابع هدف ACS بوده که مجموع AMC، AFC، AEC و ARC و ACC سالیانه واحد تولید i ام می‌باشد.

$$ACS = \sum_{i=1}^n (ACC + ARC + AMC + AFC + AEC) \quad (3)$$

مولفه سوم تابع هدف، هزینه انرژی تولیدی توسط سیستم قدرت پیشنهادی می‌باشد.

$$COE = \frac{ACS}{AEP} \quad (4)$$

که در آن AEP تولید انرژی سالیانه (kWh) و COE هزینه انرژی (\$/kWh) می‌باشد.

۲-۱-۲- قیود تابع هدف

تابع چند هدفه این تحقیق باید قیود عملکردی زیر را در نظر بگیرد:

۲-۱-۱- قیود تعادل سیستم قدرت

زمانی که توان تولیدی دیزل ژنراتور، سیستم PV و BSS در محدوده کاری سیستم می‌باشد، بار مورد نیاز سیستم توسط آنها برآورده می‌شود. توان تولیدی از واحدهای تولید لیست شده باید تقاضای بار در نقاط بار را برآورده کند. سیستم قدرت توسط قیود ارائه شده در معادله ۵ به صورت زیر محدود می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} P_i(i, t) + \sum_{j=1}^{N_{pv}} P_r(j, t) - \sum_{k=1}^{N_{bss}} P_r(k, t) + \sum_{m=1}^{N_{bss}} P_r(m, t) + \sum_{n=1}^{N_{wtg}} P_\delta(n, t) = \sum_{z=1}^{N_D} P_D(z, t) \quad (5)$$

۲-۱-۲- قیود خروجی توان تولیدی

توان خروجی هر واحد تولید به محدوده ماکسیمم و مینیمم تولید توان مشخص شده توسط هر سازنده تجهیزات محدود می‌شود. محدوده توان تولیدی توسط هر واحد تولید مانند آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده، می‌تواند مانند معادله به صورت زیر بیان شود:

$$P_i^{min}(i, t) \leq P_i(i, t) \leq P_i^{max}(i, t) \quad (6)$$

$$P_r^{min} \leq P_r(j, t) \leq P_r^{max}(j, t) \quad (7)$$

$$P_r^{min}(k, t) \leq P_r(k, t) \leq P_r^{max}(k, t) \quad (8)$$

$$P_r^{min}(m, t) \leq P_r(m, t) \leq P_r^{max}(m, t) \quad (9)$$

$$P_\delta^{min}(n, t) \leq P_\delta(n, t) \leq P_\delta^{max}(n, t) \quad (10)$$

که در آن $C_{arep,i}$ هزینه جایگزینی سالیانه هر جزء از سیستم ریزشبه، SFF ضریب استهلاک و C_{rep} هزینه جایگزینی هر جزء می باشد.

ضریب سرمایه استهلاک (SFF) به صورت زیر بیان می شود [۳۸]:

$$SFF(i, P_{proj}) = \frac{i}{(1+i)^{P_{proj}} - 1} \quad (۱۷)$$

۲-۱-۶- هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه

هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه یک سیستم ریزشبه با در نظر گرفتن نرخ تورم سالیانه محاسبه می شود. هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه در n امین سال به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$AMC = C_{amain,i} \sum_{i=1}^n (DGEN + WTG + PV + BSS + Conv)$$

هزینه تعمیر و نگهداری برای دیزل ژنراتور متناسب با توان تولیدی توسط واحد I فرض می شود. ضریب تناسب تعمیر و نگهداری (C_i^{om}) برای دیزل ژنراتور استفاده شده برابر با $0.01254 \$/kWh$ فرض می شود. هزینه تعمیر و نگهداری برای PV, WTG, BSS & Conv استفاده از نرخ ظرفیت (CR) تجهیزات و نرخ شارژ ثابت تعمیر و نگهداری (FCR) تخمین زده می شود.

$$MC = \sum_{i=1}^n C_i^{om} P_i + CR_i \times FCR_i \left(\frac{\$}{hr} \right) \quad (۱۹)$$

هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه در n امین سال هر جزء از ریزشبه در معادله ۵۹ به صورت زیر بیان می شود:

$$C_{amain} = MC(1+f)^{P_{proj}} \quad (۲۰)$$

که در آن C_i^{om} ضریب تناسب تعمیر و نگهداری، IC_i ظرفیت نصب شده، FCR_i نرخ شارژ ثابت تعمیر و نگهداری، C_{amain} هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه در n امین سال هر جزء از سیستم ترکیبی، CR نرخ ظرفیت و MC هزینه تعمیر و نگهداری برای هر جزء سیستم ریزشبه می باشد.

۲-۱-۷- هزینه سوخت سالیانه

هزینه سوخت سالیانه، هزینه سوخت برای کارکردن دیزل ژنراتور در کل طول عمرش در یک سیستم قدرت می باشد. این مقدار توسط رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$AFC = C_{afuel,i} \quad (۲۱)$$

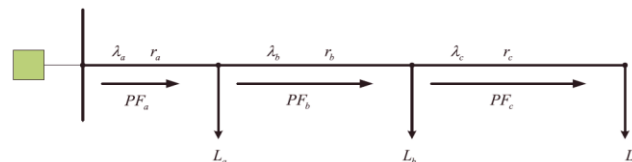
هزینه سوخت برای n امین سال به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$C_{afuel,i} = FC(1+f)^{P_{proj}} \quad (۲۲)$$

که در آن $C_{afuel,i}$ هزینه سوخت برای n امین سال است.

هزینه سوخت (FC) دیزل ژنراتور به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} EENS &= P_i U_i \left(MW \frac{hr}{yr} \right) = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i L_i \\ &= \lambda_a r_a L_a + (\lambda_a r_a + \lambda_b r_b) L_b \\ &\quad + (\lambda_a r_a + \lambda_b r_b + \lambda_c r_c) L_c \\ &= PF_a \lambda_a r_a + PF_b \lambda_b r_b + PF_c \lambda_c r_c \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i PF_i \end{aligned} \quad (۱۴)$$



شکل ۲: یک سیستم توزیع با خطوط بخش های مختلف

که در آن n تعداد خاموشی ها در نقطه بار i ، r_i مدت زمانی خرابی در نقطه بار i ، U_i مدت زمان قطعی سالیانه در نقطه بار i و PF_a, PF_b, PF_c توان جاری شده در بخش خطوط a, b, c را نشان می دهد.

۲-۱-۴- هزینه قطعی مورد انتظار

شاخص هزینه قطعی مورد انتظار (ECOST)، هزینه عدم تامین مصرف کننده در نقاط بار به سبب خاموشی وابسته به خرابی اجزا در سیستم قدرت می باشد. ECOST به مشخصات مصرف کنندگان وابسته است.

$$\begin{aligned} ECOST &= P_i \sum N_e f_{r,j} \lambda_i \left(\frac{K\$}{yr} \right) \\ &= P_a N_e f_{a,j} \lambda_a + P_b N_e f_{b,j} \lambda_b + P_c N_e f_{c,j} \lambda_c \end{aligned} \quad (۱۵)$$

که در آن N_e تعداد اجزایی که خرابی آنها موجب خاموشی در نقطه بار i می شود، $f_{r,i}$ هزینه قطع/تابع مصرف کننده مرکب آسیب دیده (CCDF) می باشد و P_i بار متوسط (MW) می باشد.

۲-۱-۵- هزینه جایگزینی سالیانه

هزینه جایگزینی سالیانه (ARC)، هزینه جایگزین کردن هر جزء در طول عمر یک پروژه می باشد. هزینه جایگزینی سالیانه یک سیستم ریزشبه به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$ARC = C_{acap,i} \sum_{i=1}^n (DGEN + WTG + PV + BSS + Conv)$$

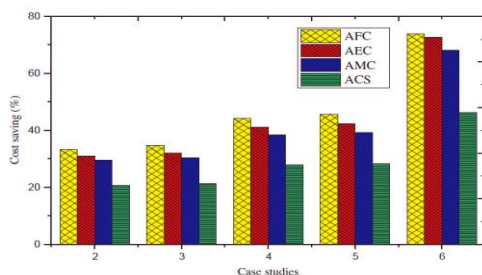
هزینه جایگزینی سالیانه در n امین سال برای هر جزء از سیستم ریزشبه به صورت ریاضی در معادله ۵۵ نشان داده شده و برابر است با:

$$C_{arep,i} = C_{rep} \times SFF(i, P_{proj}) \quad (۱۶)$$

تجدیدپذیر بر سیستم قدرت با استفاده از مطالعات موردی زیر بررسی می‌شود:

- مطالعه موردی ۱: سیستم ریزشبه دیزل ژنراتور و سیستم WTG دارد،
- مطالعه موردی ۲: سیستم ریزشبه دیزل ژنراتور، سیستم WTG و BSS دارد، و
- مطالعه موردی ۳: سیستم ریزشبه دیزل ژنراتور، سیستم PV، WTG و BSS دارد.

مطالعه موردی ۱: در این حالت، ظرفیت نصب شده دیزل ژنراتور و سیستم WTG به ترتیب برابر با ۲۴,۳۲ MW و ۱۲ MW می‌باشد. این بخش اثرات ورود سیستم WTG بر ریزشبه با در نظر گرفتن تمام مولفه های سیستم قدرت را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۱۳a تایید کردند که افزایش ورود سیستم WTG در سیستم ریزشبه، مقادیر NPC, COE, AEC, AMC, AFC, ACS را کاهش می‌دهد. اثرات اقتصادی و محیطی استفاده از سیستم WTG در سیستم قدرت پیشنهادی در شکل ۱۳b ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد ذخیره هزینه ACS, AFC, AMC, AEC تا حد زیادی بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۳ به ترتیب تا ۲۷/۸۷٪، ۴۴/۱۸٪، ۳۸/۳۰٪ و ۴۱/۱۳٪ افزایش می‌یابد. بهبود قابل توجهی در هزینه ذخیره شده سیستم در مقایسه با حالتی که تقاضای توان تنها توسط یک منبع برآورده می‌شود، مشاهده شد. تایید شده است که با افزایش ورود سیستم WTG، مصرف سوخت سالانه تا ۴۴/۱۸٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۳: اثرات اقتصادی و محیطی استفاده از سیستم WTG در سیستم قدرت ورود سیستم WTG به سیستم ریزشبه اثر شدیدی نیز بر قابلیت اطمینان سیستم توزیع دارد. هزینه‌های خاموشی توان برای مصرف کنندگان در نقاط بار به طور چشمگیری کاهش یافته که به معنی دیگر ذخیره هزینه های EENS, ECOST, TOC به ترتیب ۱۹/۲۱٪، ۱۴/۲۶٪ و ۱۷/۰۱٪ بیشتر شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه موردی نشان داد که افزایش ذخیره هزینه های EENS, ECOST, TOC با ورود سیستم WTG به سرعت افزایش می‌یابد که در شکل ۱۵ نیز ارائه شده است. این امر در نهایت تعداد دفعات و

$$FC = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad \$/h \quad (22)$$

که در آن FC هزینه سوخت و a, b, c ضرایب هزینه دیزل ژنراتور می‌باشد.

۲-۱-۸- هزینه آلودگی سالیانه

مقدار آلودگی GHG ناشی از دیزل ژنراتور با استفاده از AEC اندازه گیری می‌شود. این مقدار به مشخصه دیزل ژنراتور و نوع آن و مشخصه سوخت مصرفی توسط اپراتورهای شبکه توزیع بستگی دارد. AEC برای دیزل ژنراتور با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$AEC = C_{aemission,i} \sum_{i=1}^n (DGEN) \quad (23)$$

هزینه آلودگی برای n امین سال به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$C_{aemission,i} = EC(1 + f_p)^{P_{proj}} \quad (24)$$

که در آن $C_{aemission,i}$ هزینه آلودگی سالیانه دیزل ژنراتور می‌باشد.

۲-۱-۹- مجموع هزینه کنونی

NPC مربوط به یک پروژه بر اساس مجموع هزینه های کنونی شبکه یعنی هزینه سرمایه، هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه های سوخت، هزینه های آلودگی و هزینه های جایگزینی هر جزء از سیستم ترکیبی می‌باشد. سرمایه گذاران و بهره برداران می‌توانند از NPC به منظور تعیین هزینه و سود هر نوع سرمایه گذاری در پروژه انرژی تجدیدپذیر استفاده کنند. NPC ابزار مفیدی است که می‌تواند برای تعیین اینکه آیا خرج کردن پول بر روی پروژه انرژی های تجدیدپذیر موجب سود یا ضرر می‌شود، استفاده شود. اگر تعدادی از گزینه ها در میان ساختارهای متعدد سیستم ریزشبه در نظر گرفته شوند، آنگاه گزینه ای با کمترین NPC بهترین گزینه از نظر مالی خواهد بود. NPC در این تحقیق به منظور یافتن امکان پذیرترین گزینه در میان ساختارهای متعدد سیستم های قدرت استفاده شده است. این امر در به صورت زیر بیان می‌شود:

$$NPC = \frac{ACS}{CFR} \frac{\$}{yr} \quad (25)$$

۳- نتایج شبیه سازی

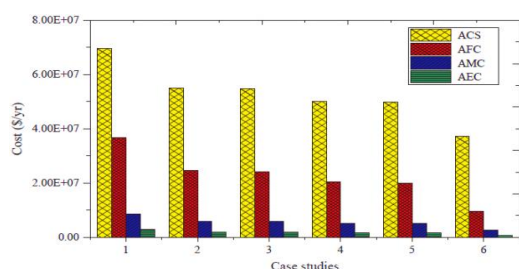
این بخش مزایای اقتصادی و قابلیت اطمینان استفاده از RER ها در یک سیستم قدرت را توضیح می‌دهد. یک سیستم توزیع RBTS اصلاح یافته برای بررسی اثرات استفاده از RER در سیستم قدرت استفاده می‌شود. برای داشتن یک دید واضح از اثرات انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت، تعدادی مطالعه موردی بررسی و تجزیه و تحلیل شده اند. از این رو، اثرات تکنولوژی های DG انرژی

داشته است. ورود سیستم WTG و BSS در سیستم قدرت قابلیت اطمینان را افزایش داده و هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت پیشنهادی را بهینه می‌کند.

جدول ۱: اثرات ورود WTG، PV و BSS بر آلودگی و مصرف سوخت سالانه

تعریف	مورد مطالعاتی ۱	مورد مطالعاتی ۲	مورد مطالعاتی ۳
سوخت	۲۲۵۷۳۰۰۰	۲۲۰۱۷۰۰۰	۱۰۵۶۴۰۰۰
$CO_2(kg/yr)$	۵۶۵۲۱۰۰۰	۵۵۴۶۳۰۰۰	۲۶۳۴۶۰۰۰
$NO_x(kg/yr)$	۵۷۵۶۷۰	۵۶۴۹۰۰	۲۶۸۳۴۰
$SO_2(kg/yr)$	۳۰۹۲۹	۳۰۳۵۱	۱۴۴۱۷

مطالعه موردی ۳: در این حالت، ظرفیت نصب شده دیزل ژنراتور، سیستم PV، سیستم WTG و BSS به ترتیب برابر با ۱۲، ۱۲، ۲۴/۳۲ و ۲ مگاوات می‌باشد. مقادیر ACS، AFC، AMC، AEC، COE، NPC برای این حالت در مقایسه با حالت اول به طور چشمگیری کاهش یافته و در شکل ۴ ترسیم شده است. این حالت این واقعیت را تایید کرد که بر اساس نتایج ارائه شده، مزیت‌هایی را می‌توان با استفاده از RER ها و واحدهای BSS به دست آورد.



شکل ۴: مقادیر ACS، AFC، AMC، AEC، COE، NPC در مطالعه موردی ۳

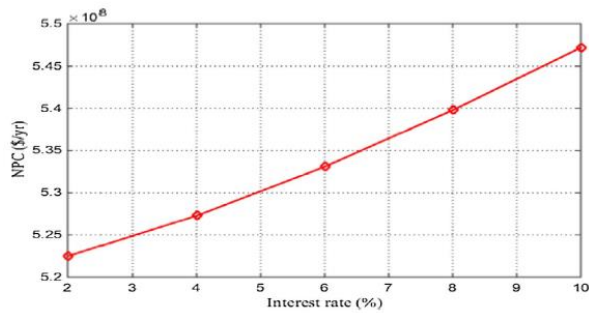
نتایج به دست آمده از استفاده از سیستم‌های PV و WTG و BSS ارائه شده در شکل ۳ نشان داد که ذخیره هزینه‌های ACS، AFC، AMC، AEC به طور قابل توجهی به ترتیب ۷۳/۸۸٪، ۴۶٪، ۶۸/۰۷٪ و ۷۲/۵۶٪ بیشتر شده است. مقدار آلودگی تولیدی CO_2 ، SO_2 ، NO_x و مصرف سوخت دیزل ژنراتور در جدول ۱ ارائه شده است. این مقادیر با به کارگیری RER ها کاهش بسیاری داشته‌اند. مقدار آلودگی CO_2 ، SO_2 ، NO_x و مصرف سوخت با ورود سیستم‌های PV و WTG و BSS ها در سال کاهش یافته است. مصرف سوخت سالانه دیزل ژنراتور ۷۳/۸۸٪ با به کارگیری سیستم‌های PV، WTG و BSS کاهش یافته است.

مقادیر EENS، ECOST، TOC در این حالت نشان داد که ذخیره هزینه‌های EENS، ECOST، TOC به ترتیب ۵۴/۹۰٪، ۵۳/۶۰٪ و

زمان خاموشی در نقاط بار مصرف کنندگان را نیز کاهش می‌دهد. مقدار SAIFI سیستم از ۰/۸۶۵۴ بار برای هر مصرف کننده در سال تا ۰/۶۶۲ بار کاهش یافته و بهبود ۲۳/۵٪ داشته است در حالی که SAIDI نیز از ۲/۰۲۹۱ ساعت برای هر مصرف کننده در سال تا ۱/۶۰۴۸ ساعت کاهش یافته و بهبود ۲۰/۹۱٪ داشته است که در شکل ۱۵c-d نشان داده شده است. کاهش در مقادیر SAIDI و SAIFI اثرات مثبت RER ها بر سیستم قدرت را نشان می‌دهد. افزایش ورود سیستم WTG به سیستم ریزشبه مقدار COE که منبع چالشی برای بهره‌برداران سیستم می‌باشد را نیز کاهش داده است. همچنین ACS و خاموشی‌ها در نقاط بار را نیز کاهش داده، به علاوه بازدهی سیستم قدرت را افزایش و در نتیجه عملکرد سیستم را تقویت کرده است.

مطالعه موردی ۲: در این حالت، ظرفیت‌های دیزل ژنراتور، سیستم WTG و BSS برابر با ۲۴، ۳۲ MW و ۱۲ MW می‌باشد. اثرات سیستم WTG و BSS بر سیستم ریزشبه در این بخش با نتایج ACS، AFC، AMC، AEC، COE، NPC بررسی و در شکل‌های ۱۳a-b ارائه شده است. حضور سیستم WTG و واحدهای BSS در سیستم قدرت موجود، ذخیره هزینه‌های ACS، AFC، AMC، AEC را به ترتیب ۲۸/۲۶٪، ۴۶/۵۶٪، ۳۹/۱۶٪ و ۴۲/۲۳٪ براساس نتایج نشان داده شده در شکل ۳، بیشتر کرده است. شاخص‌های بهره‌برداری کلیدی مذکور در مقایسه با حالت اول که تنها یک دیزل ژنراتور تقاضای بار را برآورده می‌کرد، اقتصادی‌تر می‌باشد. افزایش ورود سیستم WTG و BSS در سیستم قدرت پیشنهادی اثر شدیدی بر مقدار آلودگی CO_2 ، SO_2 ، NO_x انتشار یافته در اتمسفر و سوخت مصرفی ژنراتور دارد که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است. مقدار آلودگی CO_2 ، SO_2 ، NO_x و مصرف سوخت کاهش یافته در هر سال با ورود سیستم WTG و BSS هست. به کارگیری سیستم WTG و BSS در سیستم ریزشبه، مصرف سوخت دیزل ژنراتور را ۴۵/۵۶٪ کاهش داده است.

ورود سیستم WTG و BSS در نقاط باری که مصرف کنندگان آن مسکونی، تجاری، صنعتی، ساختمان‌های اداری و دولتی و موسسات هستند، ذخیره هزینه‌های EENS، ECOST، TOC را نسبت به مطالعه موردی اول افزایش داده است. نتایج به دست آمده از ورود سیستم WTG و BSS به سیستم قدرت نشان داد که ذخیره هزینه‌های شاخص‌های قابلیت اطمینان بالا به صورت زیر افزایش یافته است: EENS:33.90%، ECOST:43.73% & TOC: 38.27%. ذخیره هزینه‌های به دست آمده از به کارگیری RER ها می‌تواند سود بهره‌برداران را نیز افزایش دهد. مقدار SAIFI سیستم از ۰/۸۶۵۴ بار برای هر مصرف کننده در سال تا ۰/۵۹۲۳ بار کاهش و ۲۳/۵٪ بهبود داشته است، در حالی که SAIDI نیز از ۲/۰۲۹۱ ساعت برای هر مصرف کننده در سال تا ۱/۴۷۵۹ ساعت کاهش و ۲۰/۹۱٪ بهبود



شکل ۵: اثرات تغییر نرخ سود بر COE (ب) اثرات تغییر نرخ سود بر NPC (ج) اثرات تغییر نرخ سود بر ACS

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، قابلیت اطمینان، مزایای محیطی و اقتصادی بررسی شد. ورود RER ها به سیستم قدرت پیشنهادی اثرات هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را نشان داد. نتایج به دست آمده از این تحقیق اثرات قابل توجه RER ها و BSS بر شاخص‌های قابلیت اطمینان و COE و ACS سیستم قدرت را منتشر کرد. AFC, AMC, AEC با بیشترین درصد از ACS سیستم را داشتند، به طور چشمگیری بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق کاهش یافتند. ورود RER ها به یک سیستم قدرت مصرف سوخت و مقدار CO_2 , SO_2 , NO_x منتشر شده در اتمسفر توسط واحدهای تولید توان سنتی را کاهش می‌دهد. با قوانینی که دولت برای تشویق تعبیه کردن واحدهای تولید در نظر گرفته است، ملزوم شده که RER ها باید به کار گرفته شوند تا توان مورد نیاز مصرف کننده را تامین کنند. این امر قطع توان و قطع بار را کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده از این تحقیق این واقعیت را تثبیت کرد که راه حل بهینه برای کاهش قطعی توان و هزینه ها به مدیریت مناسب خاموشی ها در سیستم توزیع وابسته است که می تواند با ورود PV، WTG و BSS در سیستم به دست آید.

مراجع

- [1] Zhang C, Zhao T, Xu Q, An L, Zhao G. Effects of operating temperature on the performance of vanadium redox flow batteries. Appl Energy 2015;155:349–53.
- [2] Adefarati T, Bansal RC. The impacts of PV-wind-diesel-electric storage hybrid system on the reliability of a power system. Energy Procedia 2017;105:616–21.
- [3] Billinton R, Allan RN. Reliability evaluation of engineering systems. Springer; 1992.
- [4] Yang X, Yang Y, Liu Y, Deng Z. A reliability assessment approach for electric power systems considering wind power uncertainty. IEEE Access. 2020 Jan 13;8:12467-78.
- [5] Uzum B, Onen A, Hasanien HM, Muyeen SM. Rooftop Solar PV Penetration Impacts on Distribution Network and Further Growth Factors—A Comprehensive Review. Electronics. 2021 Jan;10(1):55.
- [6] Das BK, Al-Abdeli YM, Kothapalli G. Optimisation of stand-alone hybrid energy systems supplemented by

۵۴٪/۳۲ با به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر شده است. ذخیره هزینه بیشتر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم افزایش یافته است. مقدار SAIFI سیستم از ۰/۸۶۵۴ بار برای هر مصرف کننده در سال تا ۰/۳۶۳۵ بار کاهش و ۵۸٪ بهبود داشته در حالی که SAIDI از ۲/۰۲۹۱ ساعت برای هر مصرف کننده در سال تا ۱/۰۰۹۹ ساعت کاهش و بهبود قابل توجه ۵۰/۲۲٪ داشته است. ماکسیمم کاهش در هزینه وابسته به خاموشی ها که در نقاط بار رخ داده، زمانی است که تمام RER ها، دیزل ژنراتور و BSS استفاده شوند. این واقعیت که ورود RER ها و BSS به سیستم قدرت قابلیت اطمینان سیستم پیشنهادی را بیشتر می‌کند نیز تایید شد.

COE و ACS سیستم قدرت با ورود سیستم WTG، PV و BSS بهتر شده است. تعداد BSS و RER اضافی به طور قابل توجهی قابلیت اطمینان سیستم را بهتر می‌کند. از این مطالعه پیشنهاد می‌شود که ذخیره قابل توجه سوخت، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و آلودگی و همچنین بهبود قابل توجه در قابلیت اطمینان سیستم قدرت پیشنهادی با به کارگیری RER ها به دست می‌آید. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داده که آخرین حالت در نظر گرفته شده در مقایسه با دیگر استراتژی‌ها بهترین گزینه بر حسب آلودگی، قابلیت اطمینان و مزایای اقتصادی می باشد. بنابراین مطالعه موردی ۳ کمترین COE (۰/۲۵۵۴ \$/kWh) ACS (۲۷۰,۲۲۰,۰۰۰ \$/yr)، NPC (۱۷۵,۲۴۰,۰۰۰ \$/yr) TOC (۱۰۳۲۲۸ \$/yr) و AEC (۱۶۵,۲۴۰,۰۰۰ \$/yr) را دارد. علاوه بر این موارد، بهره برداران می‌توانند از قدرت یک RER برای غلبه بر ضعف دیگر RER ها بر اساس داده های هواشناسی موجود استفاده کنند.

۳-۱- اثرات تغییرات نرخ سود

این بخش اثرات تغییرات نرخ سود بر پارامترهای بهره برداری ریزشکه پیشنهادی را تجزیه و تحلیل می‌کند. در این خصوص، اثرات تغییرات نرخ سود اجزای اصلی RER ها، BSS و دیزل ژنراتور بر COE, NPC, ACS بررسی شده است. از نتایج ارائه شده در شکل ۵ این واقعیت آشکار می‌شود که مقادیر COE, NPC, ACS متناسب با تغییرات مقدار نرخ سود تغییر می‌کند. این امر نشان می‌دهد که تغییرات نرخ سود اثرات قابل توجهی بر پارامترهای بهره برداری مذکور دارد.

- combustion-based prime movers. *Appl Energy* 2017;۳۳-196:18
- [7] Adefarati T, Bansal RC. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IET Renew Power Gener* 2017;10:873–84.
- [8] Ogunjuyigbe A, Ayodele T, Akinola O. Optimal allocation and sizing of PV/wind/ split-diesel/battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Appl Energy* ۲۰۱۷; 71-171:153.
- [9] Hurley W, Orthmann A, Lieberman P, Enis B. Engineering and Cost Study of an Offshore Wind Farm Compressed Air Energy Storage System. In 2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES) 2019 Jul 10 (pp. 1-11). IEEE.
- [10] Thapa S, Karki R. Reliability benefit of energy storage in wind integrated power system operation. *IET Gener Transm Distrib* 2016;10:807–14.
- [11] Hussain S, Alammari R, Jafarullah M, Iqbal A, Padmanaban S. Optimization of hybrid renewable energy system using iterative filter selection approach. *IET Renewable Power Generation*, available online; 2017.
- [12] Khaledian A, Ahmadian A, Golkar MA. Optimal droop gains assignment for real time energy management in an islanding microgrid: A two-layer techno-economic approach. *IET Generation, Transmission Distribution* 2017;11:2292–۳۰۴.
- [13] Khare V, Nema S, Baredar P. Optimisation of the hybrid renewable energy system by HOMER, PSO and CPSO for the study area. *Int J Sustain Energy* 2017;36:326–43.
- [14] Govardhan M, Roy R. Comparative analysis of economic viability with distributed energy resources on unit commitment. *Electric Power Compon Syst* 2016;44:1588:607.
- [15] Iqbal A, Arif MSB, Ayob SM, Siddiqui K. Analysis of a solar PV/battery/DG setbased hybrid system for a typical telecom load: a case study. *Int J Sustain Energy* 2017. 76-36:259.
- [16] González A, Riba J-R, Rius A, Puig R. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Appl Energy* 2015;154:752–62.
- [17] Ayodele T. Feasibility study of stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Nigeria: the case study of Ala-Ajagbusi community. *Int Journal of Renewable Energy Resources* 2014;4:1–12.
- [18] Adefarati T, Bansal RC, Justo JJ. Reliability and economic evaluation of a microgrid power system. *Energy Procedia*. 2017 Dec 1;142:43-8.
- [19] Ramli MA, Hiendro A, Al-Turki YA. Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia. *Renewable Energy* ۲۰۱۹;۹۱:۳۷۴–۸۵.
- [20] Notton G, Diaf S, Stoyanov L. Hybrid photovoltaic/wind energy systems for remote locations. *Energy Procedia* ۲۰۱۸;۶:۶۶۶–۷۷.