

بهبود کفایت سیستم قدرت با کاهش نوسانات توان خروجی مزارع بادی به وسیله ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی

^۱ محمد حسین خانی، ^۲ محمد نجاتی، ^۳ بهروز محمدی

^۱ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، hosseinkhanie.mohammad@gmail.com

^۲ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، mnejati1@gmail.com

^۳ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، b.mohamadi1385@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر، سطح نفوذ توان بادی در سیستم قدرت به شدت در حال افزایش می‌باشد. توان خروجی مزارع در هر لحظه به سرعت باد در آن لحظه وابسته می‌باشد. به دلیل تغییرات زیاد سرعت باد، توان خروجی مزارع بادی نوسانی و غیر قابل کنترل می‌باشد. بنابراین افزایش سطح نفوذ توان بادی، سیستم قدرت را با چالش‌های جدیدی در رابطه با پایداری و قابلیت اطمینان سیستم روبرو می‌سازد. یکی از راه‌حل‌های عملی در کاهش نوسانات توان خروجی مزارع بادی استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی می‌باشد. ذخیره‌سازهای انرژی با کاهش نوسانات توان موجب افزایش دسترس پذیری توان بادی می‌شوند. در این مقاله در ابتدا تاثیر ذخیره‌ساز بر روی کاهش نوسانات توان بادی و افزایش در دسترس پذیری آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نحوه مدلسازی بخش‌های مختلف سیستم قدرت در مطالعات کفایت سیستم تولید بیان شده است. در قسمت پایانی، به تاثیر استفاده از ذخیره‌ساز انرژی در کاهش نوسانات توان بادی و بهبود کفایت سیستم قدرت پرداخته شده است. ابتدا به یک سیستم قدرت نمونه، مزرعه بادی اضافه شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان آن محاسبه می‌شود. سپس با اضافه کردن ذخیره ساز انرژی به مزرعه بادی، تاثیر مشخصات مختلف ذخیره‌ساز، در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی و گرفتن نتایج از روش مونت کارلوی ترتیبی استفاده می‌شود.

واژه های کلیدی: قابلیت اطمینان، مزارع بادی، ذخیره‌ساز، سرعت باد، نوسانات توان، شبیه‌سازی مونت کارلو.

۱- مقدمه

زمینه برنامه ریزی، کیفیت توان و قابلیت اطمینان روبرو می‌شوند. متغیر بودن توان خروجی نیروگاه بادی، موجب نامتعادلی بین تولید و بار شده و قابلیت اطمینان سیستم قدرت را کاهش می‌دهد. یکی از راه‌حل‌های عملی در کاهش نوسانات توان بادی و حفظ تعادل بین تولید و تقاضای بار استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی در نیروگاه‌های بادی می‌باشد. وظیفه اصلی ذخیره‌سازهای انرژی در مزارع بادی کاهش نوسانات توان خروجی است. تحقیقات نشان می‌دهد که به منظور کاهش ۱۰ درصد از نوسانات توان خروجی، به ازای هر ۱ مگاوات توان بادی ۳ مگاوات ساعت ظرفیت ذخیره سازی مورد نیاز می‌باشد [۸].

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش روز افزون بهای سوخت‌های فسیلی و همچنین نگرانی‌های زیست محیطی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به سرعت در حال گسترش است. از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر منابع بادی می‌باشند که به منظور تامین تقاضای انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت نصب شده توان بادی در جهان سال به سال در حال افزایش می‌باشد و این ظرفیت در پایان سال ۲۰۱۲ با افزایش ۲۵ درصدی نسبت به سال ۲۰۱۱ میلادی به حدود ۲۸۰۰۰۰ مگاوات رسیده است [۱].

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در رابطه با ذخیره‌سازهای انرژی و تاثیر آنها بر عملکرد سیستم قدرت انجام شده است. در [۱۰]

به موجب تغییرات سرعت باد، توان خروجی نیروگاه‌های بادی به شدت نوسانی و غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد. بنابراین با گسترش نفوذ نیروگاه‌های بادی، سیستم‌های قدرت با چالش‌های جدیدی در

سیستم ذخیره‌ساز انرژی باید چندین هدف را به طور همزمان برآورده سازد.

۲-۱- کاهش نوسانات توان خروجی مزارع بادی با

استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی

وظیفه اصلی ذخیره‌سازهای انرژی در نیروگاه‌های بادی کاهش نوسانات توان خروجی می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهند که به منظور کاهش ۱۰ درصد از نوسانات توان بادی، به ازای هر مگاوات توان بادی ۳ MWh ظرفیت ذخیره‌ساز نیاز است. همچنین با استفاده از ذخیره‌سازهایی که به ازای هر مگاوات توان بادی دارای ۲۵ MWh ظرفیت ذخیره‌سازی می‌باشند، می‌توان نوسانات توان بادی را تا نصف کاهش داد. در واقع ذخیره‌ساز انرژی همچون یک فیلتری که ثابت زمانی آن متناسب با ظرفیت ذخیره‌ساز است، عمل کرده و موجب کاهش نوسانات توان بادی می‌شوند [۸].

بنابراین مقدار کاهش نوسانات توان بادی با ظرفیت ذخیره‌ساز رابطه مستقیم دارد و برای کاهش نوسانات در بازه‌های زمانی بزرگتر نیاز به ذخیره‌سازهایی با ظرفیت ذخیره‌سازی بالا داریم. اما به دلیل مشکلاتی که در تکنولوژی ساخت ذخیره‌سازها و همچنین هزینه بالای آنها وجود دارد، ذخیره‌سازها در ظرفیت‌های محدود ساخته می‌شوند. بنابراین بازه زمانی که باید توان خروجی مزرعه بادی را ثابت نگه‌داریم در تعیین ظرفیت ذخیره‌ساز موثر می‌باشد. پارامتر دیگری که در انتخاب ظرفیت ذخیره‌ساز موثر است، دامنه تغییرات سرعت باد در سایت بادی مورد مطالعه می‌باشد. به طوری که در سایت‌های بادی دارای تغییرات سرعت باد با دامنه زیاد نسبت به سایت‌هایی با تغییرات سرعت باد با دامنه کم، به منظور کاهش نوسانات توان در یک بازه زمانی مشخص، به ذخیره‌سازهایی با ظرفیت بیشتر نیاز است.

۲-۲- افزایش در دسترس‌پذیری توان بادی با استفاده

از ذخیره‌سازهای انرژی در مزارع بادی

به دلیل حفظ پایداری شبکه قدرت، سطح نفوذ توان بادی را در یک مقدار مشخص محدود می‌کنند. در واقع به موجب نوسانی بودن و غیر قابل پیش‌بینی بودن توان خروجی مزارع بادی در برنامه ریزی سیستم قدرت و به دلیل حفظ پایداری سیستم تنها درصد کمی از توان بادی به منظور تامین بار شبکه اختصاص داده می‌شود. با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی می‌توان توان خروجی نیروگاه بادی را در بازه‌های زمانی مشخص ثابت نگه‌داشت، بنابراین کنترل‌پذیری و در دسترس‌پذیری توان بادی افزایش پیدا می‌کند.

ذخیره‌ساز انرژی با صاف کردن پروفیل توان خروجی، حداقل دسترس‌پذیری میانگین توان بادی را در بازه زمانی مشخص افزایش می‌دهد. شکل (۱) تابع توزیع تجمعی توان خروجی نیروگاه بادی را در دو حالت حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز انرژی نشان می‌دهد.

انواع ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصات آنها بیان شده‌است. در [۸] ذخیره‌ساز مانند یک فیلتر که ثابت زمانی آن متناسب با ظرفیت ذخیره‌ساز است مدل شده‌است. در [۵] نویسنده مقاله روشی برای ارزیابی تاثیر ذخیره‌ساز انرژی بر کیفیت توان خروجی نیروگاه بادی معرفی کرده‌است. در [۷] ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی انجام شده‌است. در [۶] شاخص جدیدی برای ارزیابی تاثیر ذخیره‌ساز بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت معرفی شده‌است. در [۳] کفایت سیستم قدرت شامل نیروگاه بادی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، در ابتدا تاثیر ذخیره‌ساز انرژی بر کاهش نوسانات توان خروجی مزارع بادی و افزایش در دسترس‌پذیری توان بادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نحوه مدل‌سازی اجزاء مختلف سیستم قدرت با هدف بررسی کفایت سیستم تولید بیان می‌شود. در نهایت تاثیر ذخیره‌ساز انرژی بر بهبود قابلیت اطمینان سیستم و افزایش سطح نفوذ توان بادی در سیستم قدرت بررسی می‌شود.

۲- سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

توان خروجی نیروگاه‌های بادی با مکعب سرعت باد رابطه مستقیم دارد. بنابراین تغییرات سرعت باد موجب نوسانات شدید در توان خروجی نیروگاه‌های بادی می‌شود. به دلیل تغییرپذیری و غیرقابل پیش‌بینی بودن منابع بادی، سیستم‌های تولید توان بادی، بیشتر از آن‌که منابع ظرفیتی باشند به عنوان منابع انرژی شناخته می‌شوند. منابع ظرفیتی آن منابعی هستند که برای تولید توان به منظور برآورده نمودن تقاضای بار در دسترس می‌باشند [۱۱]. افزایش نفوذ منابع بادی در سیستم قدرت، مشکلات جدی در حفظ تعادل بین تقاضای بار و تولید در دسترس به وجود می‌آورد. با به کارگیری ذخیره‌سازهای انرژی می‌توان عدم مطابقت بین تولید توان بادی و تقاضای بار را کاهش داد.

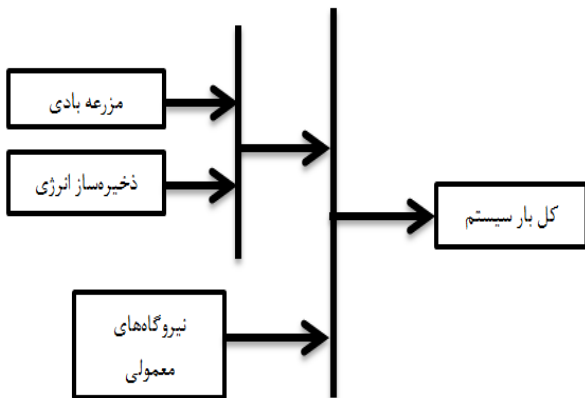
انواع مختلفی از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی الکتریکی را نمی‌توان به طور مستقیم ذخیره نمود، بلکه به منظور ذخیره‌سازی باید آن را به دیگر انواع انرژی تبدیل کرد. از این منظر، ذخیره‌سازهای انرژی به چهار گروه مکانیکی، الکترو شیمیایی، الکترومغناطیسی و گرمایی تقسیم می‌شوند. همچنین ذخیره‌سازهای انرژی را با توجه به ظرفیت ذخیره‌سازی در سه دسته ظرفیت بالا، ظرفیت متوسط و ظرفیت پایین قرار می‌دهند.

یک ذخیره‌ساز انرژی در مزارع بادی همزمان برای کاربردها و اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال یک سیستم ذخیره‌ساز هم به عنوان "ذخیره‌ساز انرژی به منظور کاهش نوسانات توان خروجی" و هم برای "شیف‌ت زمانی انرژی باد" استفاده می‌شود. مطالعات اقتصادی نشان می‌دهد که به منظور کاهش هزینه‌ها یک

سیستم، وضعیت واحدهای تولیدی در بازه زمانی یکساله شبیه‌سازی می‌شود.

۴- مدل‌سازی سیستم قدرت شامل نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی

مدل سیستم برای ارزیابی کفایت تولید شامل مزرعه بادی و ذخیره‌ساز انرژی در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) مدل تولید سیستم از جمع مدل نیروگاه‌های معمولی با مدل مزرعه و ذخیره‌ساز انرژی بدست می‌آید. سپس با اضافه کردن مدل تولید به مدل بار، مقدار رزرو سیستم بدست می‌آید. رزور منفی نشان‌دهنده کمبود توان و خاموشی در سیستم می‌باشد.



شکل (۲): مدل سیستم برای سیستم تولید شامل مزرعه بادی و ذخیره‌ساز انرژی

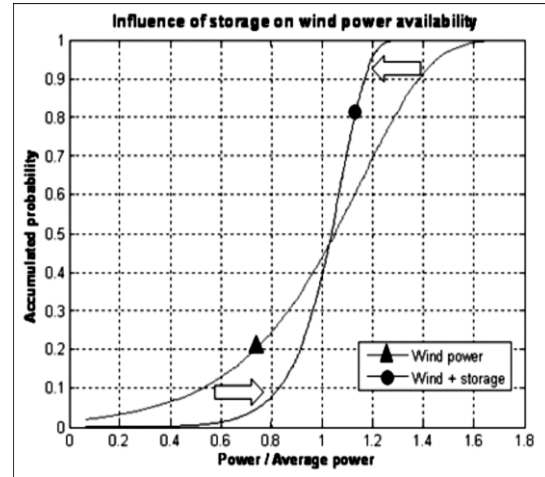
در ارزیابی کفایت سیستم، به منظور مدل‌سازی اجزاء مختلف سیستم قدرت، از اطلاعات ساعتی مربوط به تولید و بار استفاده می‌نماییم.

۴-۱- مدل بار

در اکثر مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت از اطلاعات ساعتی بار سیستم تست قابلیت اطمینان RBTS استفاده می‌شود. مدل بار را با استفاده از اطلاعات ساعتی بار در طی یک سال از رابطه (۳) بدست می‌آوریم.

$$L(t) = L_y \times P_w \times P_d \times P_h(t) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، L_y بار پیک سالانه، P_w بار هفتگی به صورت درصدی از بار پیک سالانه، P_d بار روزانه به صورت درصدی از بار پیک هفتگی، $P_h(t)$ بار ساعتی به صورت درصدی از بار پیک روزانه می‌باشد. شکل (۳) مدل بار ساعتی را برای سیستم تست RBTS که دارای بار پیک سالانه ۱۸۵ MW می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۱): تابع توزیع تجمعی توان بادی در حالت حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز انرژی [۵]

همانطور که از شکل (۲) مشخص می‌باشد در حالت حضور ذخیره‌ساز انرژی کسر قابل توجهی از توان با احتمال بالا در دسترس می‌باشد. به عنوان مثال در نیروگاه بادی تنها، فقط ۳۰ درصد از توان میانگین با احتمال ۹۵ درصد در دسترس می‌باشد در حالی که در نیروگاه بادی دارای ذخیره‌ساز انرژی، بیش از ۷۵ درصد از توان میانگین با احتمال ۹۵ درصد می‌تواند در دسترس می‌باشد [۵].

۳- ارزیابی کفایت سیستم تولید شامل مزارع بادی و ذخیره‌سازهای انرژی

کفایت سیستم تولید، توانایی سیستم در تامین بار در هر لحظه از زمان می‌باشد. هدف اصلی از ارزیابی کفایت سیستم تولید بررسی توانایی تجهیزات تولید توان در تامین بار کل سیستم می‌باشد. به منظور ارزیابی کفایت سیستم از مقایسه مدل بار با مدل تولید، مدل ریسک سیستم را بدست می‌آوریم. با استفاده از مدل ریسک سیستم شاخص‌های ریسک را محاسبه می‌نماییم. مهمترین شاخص احتمالاتی ریسک سیستم LOLE و LOEE می‌باشند. شاخص LOLE متوسط مدت زمان بر حسب ساعت در سال را نشان می‌دهد که بار سیستم از کل تولید در دسترس بیشتر می‌باشد. شاخص LOEE متوسط انرژی تغذیه نشده در هر سال را نشان می‌دهد.

$$LOLE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n t_k \quad (1)$$

$$LOEE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n e_k \quad (2)$$

که معادلات (۱) و (۲)، N تعداد سال‌های شبیه‌سازی، n تعداد کل قطعی بارها، t_k مدت زمان قطعی بار k ام و e_k مقدار انرژی تغذیه نشده در قطعی بار k ام می‌باشد. در این مقاله از روش مونت کارلوی ترتیبی جهت محاسبه شاخص‌های کفایت سیستم استفاده می‌کنیم. در این روش با در نظر گرفتن ترتیب زمانی و نرخ خرابی واحدهای

می‌باشد. تخمین پارامترهای ARMA طبق آزمون‌های آماری مختلف انجام می‌شود [۹].

سرعت باد شبیه سازی شده را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) بدست آورد.

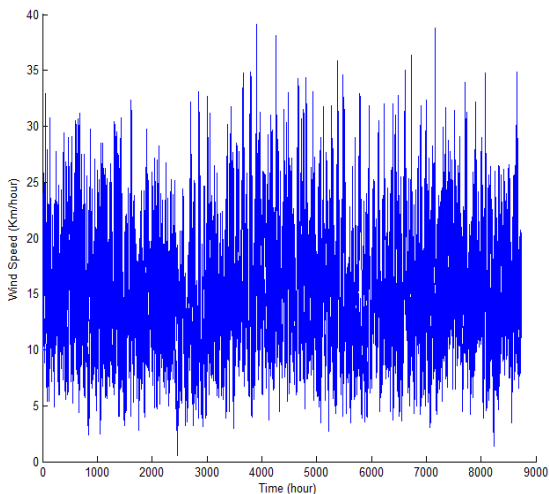
$$S_w = \mu_t + \sigma_t y_t \quad (5)$$

در رابطه بالا μ_t میانگین سرعت باد در ساعت t و σ_t انحراف معیار سرعت باد در ساعت t می‌باشد.

در این مقاله از اطلاعات ساعتی سرعت باد سایت Mandan واقع در North Dakota طی ۱۰ سال استفاده شده است [۲]. این اطلاعات برای بدست آوردن مدل ARMA مورد استفاده قرار گرفته‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده مدل $ARMA(3,2)$ برای این سایت به صورت رابطه (۶) می‌باشد

$$y_t = 0.944y_{t-1} - 0.107y_{t-2} + 0.0797y_{t-3} + \alpha_t - 0.0428\alpha_{t-1} + 0.0298\alpha_{t-2} \quad (6)$$

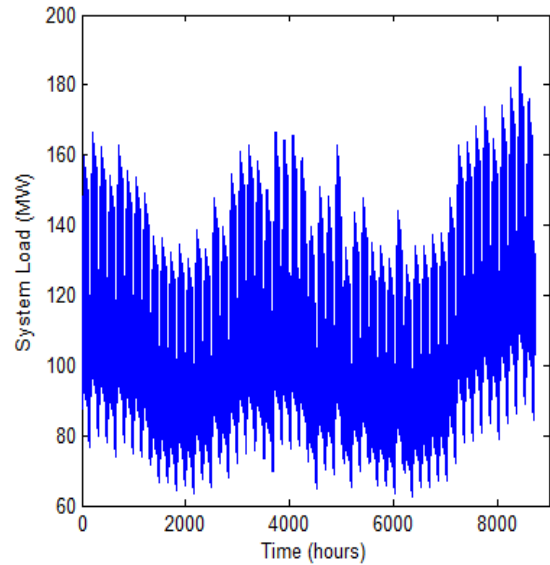
با ترکیب رابطه (۶) و (۵) می‌توان سرعت باد را برای سایت بادی مورد نظر شبیه‌سازی نمود. شکل (۴) سرعت باد شبیه‌سازی شده برای سایت بادی موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل (۴): سرعت باد ساعتی برای سایت بادی Mandan

۴-۲-۲- مدل ژنراتور توربین بادی

رابطه بین توان خروجی توربین بادی و سرعت باد غیر خطی می‌باشد و با استفاده از معادله (۷) توصیف می‌شود. به دلیل تلفات زیاد توان در سرعت‌های باد پایین، توربین‌های بادی طوری طراحی می‌شوند که در سرعت‌های باد کمتر از سرعت وصل V_{ci} توان تولید نکنند. همچنین به دلیل حفاظت توربین از خراب شدن در سرعت‌های باد خیلی بالا، آنها را طوری طراحی می‌کنند که در سرعت‌های باد بیشتر از سرعت قطع V_{co} متوقف شوند. بنابراین توربین بادی در یک رنج محدودی بین سرعت وصل V_{ci} و سرعت نامی V_r ، توان متغیر و در سرعت‌های بین سرعت نامی V_r و سرعت قطع V_{co} ، توان نامی خود را تولید می‌کند [۶].



شکل (۳): مدل بار ساعتی ترتیب زمانی برای RBTS

۴-۲-۲- مدل مزرعه بادی

اصول مدل‌سازی مزارع بادی شامل سه قسمت می‌باشد: شبیه‌سازی سرعت باد، بدست آوردن مدل تولید توان توربین بادی و جمع توان خروجی توربین‌های بادی با در نظر گرفتن سابقه عملکرد هر توربین. مرحله اول تشخیص تغییرات تصادفی سرعت باد می‌باشد. این تصادفی بودن باید شامل یک مدل مناسب به منظور منعکس کردن ویژگی‌های ترتیب زمانی و خود همبستگی سرعت باد در یک مکان جغرافیایی خاص باشد. قدم دوم در نظر گرفتن رابطه غیر خطی بین توان خروجی توربین بادی و سرعت باد است. این رابطه با استفاده از پارامترهای عملکردی و منحنی توان توربین بادی تعیین می‌شود. مرحله آخر، شامل اعمال سابقه عملکردی هر توربین بادی در مدل توان خروجی و جمع آنها به منظور بدست آوردن توان خروجی مزرعه بادی می‌باشد.

۴-۲-۱- مدل سرعت باد

هر سیستم با رفتار تصادفی را می‌توان با استفاده از سری زمانی ARMA از مرتبه $(n, n-1)$ تا حد قابل قبولی به درستی مدل نمود [۹]. با استفاده از سری زمانی ARMA می‌توان خود همبستگی مرتبه بالا و توزیع روزانه و فصلی سرعت باد واقعی را تولید نمود. بنابراین برای ارزیابی کیفیت سیستم‌های تولید شامل نیروگاه‌های بادی مناسب می‌باشد [۹]. سرعت باد برای یک سایت بادی مشخص با استفاده از مدل ARMA ویژه آن سایت شبیه‌سازی می‌شود. این مدل در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_n y_{t-n} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_m \alpha_{t-m} \quad (4)$$

که در آن y_t مقدار سری زمانی در زمان t و ϕ_i ($i=1,2,3,\dots,n$) و θ_i ($i=1,2,3,\dots,m$) به ترتیب پارامترهای خود همبسته و میانگین متحرک مدل می‌باشند. α_t نویز سفید با میانگین صفر و واریانس σ_a^2

۴-۳- مدل ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی

انرژی باد در مواقعی که سرعت باد بالاست در ذخیره‌ساز ذخیره می‌شود و در مواقعی که سرعت باد کم می‌باشد به سیستم قدرت تزریق می‌شود. هدف اصلی ذخیره‌سازهای انرژی در نیروگاه‌های بادی کاهش نوسانات توان و صاف کردن پروفیل توان خروجی می‌باشد. ذخیره‌سازهای انرژی با کاهش نوسانات توان نیروگاه بادی موجب افزایش حداقل در دسترس‌پذیری توان بادی می‌شود. ذخیره‌سازهای انرژی را با توجه به ظرفیت انرژی، نرخ شارژ و دشارژ، بازده شارژ و دشارژ و حداقل و حداکثر ظرفیت، مدل‌سازی می‌کنیم. به دلیل ملاحظات پایداری سیستم قدرت نفوذ توان بادی را به درصد معینی از بار، محدود می‌کنیم. با کاهش نوسانات توان بادی به وسیله ذخیره‌ساز انرژی سطح نفوذ توان بادی در سیستم قدرت افزایش پیدا می‌کند. به منظور ارزیابی تاثیر ذخیره‌ساز انرژی بر کفایت سیستم تولید به صورت زیر عمل می‌کنیم.

در حالتی که در بازه زمانی مورد نظر توان تولید شده نیروگاه‌های معمولی برای تغذیه بار سیستم کافی باشد. توان بادی در ذخیره‌ساز انرژی ذخیره می‌شود. اگر توان تولیدی نیروگاه‌های بادی برای تغذیه بار سیستم کافی نباشد. از توان بادی برای تغذیه بار استفاده می‌شود، در حالتی که توان بادی بیشتر از توان مورد نیاز بار باشد، این توان اضافی در ذخیره‌ساز ذخیره می‌شود. اگر توان بادی برای تغذیه بار کافی نباشد از توان ذخیره شده در ذخیره‌ساز برای تغذیه بار استفاده می‌شود. در این حالت اگر مجموع توان نیروگاه‌های معمولی، بادی و ذخیره‌ساز انرژی کمتر از تقاضای بار باشد خاموشی در سیستم رخ می‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله جهت شبیه‌سازی و گرفتن نتایج از شبکه نمونه RBTS استفاده شده است. این شبکه دارای ۱۱ نیروگاه معمولی می‌باشد که مجموع توان تولید این نیروگاه‌ها برابر با ۲۴۰ MW است و بار پیک شبکه ۱۸۵ MW می‌باشد [۴]. نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی را به شبکه RBTS اضافه نموده و تاثیر تغییر فاکتورهای مختلف در شاخص‌های LOLE و LOEE را بررسی می‌کنیم.

۵-۱- تاثیر ظرفیت نیروگاه بادی

نیروگاه بادی را به شبکه RBTS اضافه می‌کنیم و با تغییر ظرفیت نیروگاه بادی تاثیر آن را بر شاخص‌های کفایت سیستم بررسی می‌کنیم. در ارزیابی کفایت سیستم تولید مکان قرارگیری نیروگاه بادی در شبکه RBTS تاثیری بر نتایج بدست آمده ندارد. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌کنیم، شاخص‌های کفایت با افزایش ظرفیت نیروگاه بادی بهبود پیدا می‌کنند.

نکته قابل توجه در جدول (۱) این است که شیب تغییرات شاخص‌ها با افزایش ظرفیت نیروگاه بادی کمتر می‌شود. این پدیده به دلیل این حقیقت که کل تولید توربین‌های بادی در یک نیروگاه بادی تابعی از

$$P(S_{wt}) = \begin{cases} 0 & 0 \leq S_{wt} < V_{ci} \\ (A + B * S_{wt} + C * S_{wt}^2) * P_r & V_{ci} \leq S_{wt} < V_r \\ P_r & V_r \leq S_{wt} < V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq S_{wt} \end{cases} \quad (7)$$

در رابطه بالا P_r توان نامی توربین می‌باشد. پارامترهای A ، B و C با استفاده از معادلات (۸)، (۹) و (۱۰) بدست می‌آید.

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[4(V_{ci} + V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ci} + V_r) \right] \quad (9)$$

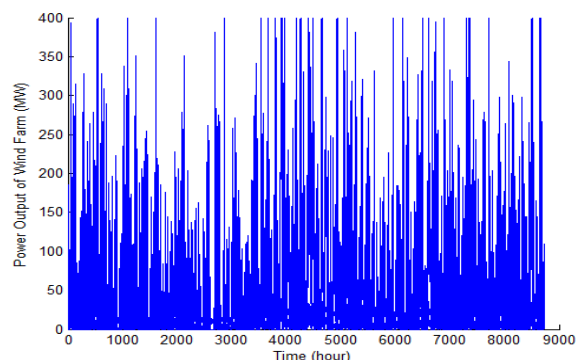
$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (10)$$

بنابراین همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، به منظور بدست آوردن توان خروجی مزرع بادی، ابتدا مدل دو حالتی هر یک از توربین‌های بادی را با توجه به مقادیر نرخ خرابی (λ) و نرخ تعمیر (μ) توربین بادی بدست می‌آوریم. سپس توان خروجی هر توربین بادی را با توجه به مشخصات سرعت باد محاسبه می‌کنیم. با ترکیب این دو مرحله مدل توان خروجی توربین حاصل می‌شود.



شکل (۵): مدل قابلیت اطمینان توربین بادی

در نهایت با جمع توان خروجی توربین‌های بادی موجود، توان خروجی مزرع بادی را محاسبه می‌نماییم. در این مطالعه فرض می‌کنیم هر یک از توربین‌های مزرع بادی دارای توان خروجی نامی ۱/۲ MW باشند. در شکل (۶) توان خروجی مزرع بادی برای رژیم بادی سایت Mandan در بازه زمانی یک‌ساله نشان داده شده است.



شکل (۶): توان خروجی شبیه‌سازی شده برای سایت بادی

Mandan

در دسترس پذیری باد در سایت بادی مفروض می‌باشد. ضریب نفوذ توان بادی را ۱۰ درصد در نظر می‌گیریم.

جدول (۱): شاخص‌های کفایت سیستم برای ظرفیت‌های مختلف

توان بادی

Wind Capacity (MW)	LOLE (hr/yr)	LOEE (MWh/yr)
۰	۱/۰۵۲	۱۰/۱۴۳
۱۰	۰/۹۲۳	۸/۸۷۴
۲۰	۰/۸۳۵	۷/۷۶۰
۳۰	۰/۷۶۴	۶/۹۱۴
۴۰	۰/۷۲۱	۶/۳۶۳
۶۰	۰/۶۸۵	۵/۹۵۷
۸۰	۰/۵۹۷	۴/۸۷۹
۱۰۰	۰/۵۷۲	۴/۴۳۹

در واقع ذخیره‌سازهای انرژی موجب بهبود کیفیت توان خروجی نیروگاه بادی شده و بنابراین سطح نفوذ توان بادی در را افزایش می‌دهند. در جدول (۳) تاثیر سطح نفوذ توان بادی بر روی شاخص‌های کفایت سیستم قدرت در حضور ذخیره‌ساز انرژی با ظرفیت ۲۰ MWh نشان داده شده است.

جدول (۳): تاثیر سطح نفوذ توان بادی

Wind Power Restriction (%)	LOLE (hr/yr)	LOEE (MWh/yr)
۰	۱/۰۵۲	۱۰/۱۴۳
۵	۰/۷۶۳	۶/۳۳۱
۱۰	۰/۶۶۳	۵/۷۶۲
۱۵	۰/۶۴۵	۵/۴۴۸
۲۰	۰/۶۳۲	۴/۹۳۲

بنابراین افزایش سطح نفوذ توان بادی در شبکه قدرت که ناشی از کاهش نوسانات توان خروجی نیروگاه بادی به وسیله ذخیره‌سازهای انرژی است، باعث بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود.

۵-۴- ظرفیت معادل نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز انرژی

مقدار ظرفیت قابل اعتبار مزرعه بادی که در مقایسه با ظرفیت نیروگاه‌های معمولی بدست می‌آید، ظرفیت معادل مزرعه بادی نامیده می‌شود. معیار سنجش در این معادل‌سازی، شاخص‌های پایایی سیستم از جمله LOLE و LOEE می‌باشد [۱۲]. الگوریتم محاسبه ظرفیت معادل مزارع بادی در حضور ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر پایایی به صورت زیر است:

- ۱- حذف یکی از نیروگاه‌های معمولی در سیستم مورد مطالعه.
- ۲- محاسبه شاخص‌های پایایی سیستم جدید.
- ۳- اضافه نمودن مزرعه بادی و ذخیره‌ساز انرژی به شبکه و افزایش ظرفیت واحد بادی به صورت پله‌ای و محاسبه شاخص‌های پایایی.
- ۴- تکرار گام سوم (افزایش ظرفیت واحد بادی) تا جایی که شاخص پایایی برابر با شاخص بدست آمده از گام دوم شود.
- ۵- مقدار ظرفیت واحد بادی که شرط مربوط به گام چهارم را برآورده می‌سازد، ظرفیت معادل واحد بادی در حضور ذخیره‌ساز به حساب می‌آید.

ظرفیت معادل یک مزرعه بادی به عواملی همچون، رژیم بادی مربوط به مزرعه بادی و ضریب نفوذ توان بادی در سیستم قدرت وابسته می‌باشد. در این قسمت ظرفیت معادل مزرعه بادی در دو حالت، حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز انرژی در مزرعه بادی، بدست آورده و تاثیر استفاده از ذخیره‌ساز انرژی بر ظرفیت معادل مزرعه

۵-۲- تاثیر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی

در این قسمت به نیروگاه بادی یک ذخیره‌ساز انرژی اضافه نموده و تاثیر آن را بر شاخص LOLE بررسی می‌نماییم. در جدول (۲) تاثیر ذخیره‌ساز را در ظرفیت‌های مختلف در حالی که ضریب نفوذ توان بادی ۱۰ درصد است، مشاهده می‌کنیم.

جدول (۲): تاثیر ذخیره‌ساز بر شاخص LOLE

Wind Capacity (MW)	ESS=۱۰ (MWh)	ESS=۲۰ (MWh)	ESS=۳۰ (MWh)
۱۰	۰/۹۰۱	۰/۸۹۳	۰/۸۶۸
۲۰	۰/۸۱۲	۰/۷۹۱	۰/۷۶۵
۳۰	۰/۷۲۲	۰/۶۸۷	۰/۶۴۱
۴۰	۰/۶۸۹	۰/۶۶۳	۰/۶۱۲
۶۰	۰/۶۴۰	۰/۵۷۳	۰/۵۱۸
۸۰	۰/۵۲۴	۰/۴۶۹	۰/۴۱۷
۱۰۰	۰/۵۲۱	۰/۴۵۲	۰/۴۰۲

بنابراین اضافه نمودن ذخیره‌ساز به نیروگاه بادی موجب بهبود شاخص‌های کفایت سیستم می‌شود. البته همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود در نیروگاه‌هایی با توان پایین، به دلیل اینکه توان کمتری در ذخیره‌ساز، ذخیره می‌شود، اضافه نمودن ذخیره‌ساز به نیروگاه‌های بادی، تاثیر کمتری بر شاخص LOLE دارد.

۵-۳- تاثیر سطح نفوذ توان بادی

همان‌طور که اشاره شد، ذخیره‌سازهای انرژی با کاهش نوسانات توان بادی موجب افزایش در دسترس‌پذیری میانگین توان بادی می‌شوند.

استفاده از ذخیره‌ساز انرژی در مزارع بادی موجب بهبود ظرفیت معادل مزرعه بادی می‌شود.

۶- نتیجه گیری

استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی در مزارع بادی موجب کاهش نوسانات توان خروجی مزارع بادی و افزایش در دسترس پذیری توان بادی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، اضافه نمودن نیروگاه بادی موجب بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود. ولی به دلیل نوسانی بودن توان بادی، درصد محدودی از تقاضای بار سیستم را به توان بادی اختصاص می‌دهند. اضافه نمودن ذخیره‌ساز انرژی به مزارع بادی موجب بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود. هر چقدر ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر باشد این بهبود، تاثیر آن بهبود کیفیت سیستم بیشتر است. ذخیره‌ساز انرژی با کاهش نوسانات توان بادی و افزایش در دسترس پذیری آن، موجب افزایش سطح نفوذ توان بادی شده و بنابراین موجب بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌های سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه بادی می‌شود.

۷- مراجع

- [۱] <http://www.gwec.net/>
- [۲] North Dakota Agriculture Weather Network, available at <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/windspeeds.html>.
- [۳] Billinton, R.; Bai, G., "Generating capacity adequacy associated with wind energy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. ۱۹, no. ۳, pp. ۶۴۱, ۶۴۶, Sept. ۲۰۰۴.
- [۴] Billinton, R.; Kumar, S.; Chowdhury, N.; Chu, K.; Debnath, K.; Goel, L.; Khan, E.; Kos, P.; Nourbakhsh, G.; Oteng-Adjei, J., "A reliability test system for educational purposes-basic data," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۱۲۳۸, ۱۲۴۴, Aug ۱۹۸۹.
- [۵] C.N. Rasmussen: "Improving wind power quality with energy storage", IEEE conference on sustainable renewable energy, Valencia, Spain, ۲۰۰۹.
- [۶] Gao, Z.Y.; Peng Wang; Jianhui Wang, "Impacts of energy storage on reliability of power systems with WTGs," *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on*, vol., no., pp. ۶۵, ۷۰, ۱۴-۱۷ June ۲۰۱۰.
- [۷] Hu, P.; Karki, R.; Billinton, R., "Reliability evaluation of generating systems containing wind power and energy storage," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. ۲, no. ۸, pp. ۷۸۳, ۷۹۱, August ۲۰۰۹.
- [۸] Paatero, J.V., Lund, P.D.: Effect of energy storage on variations in wind power. *Wind Energy* ۸, ۴۲۱-۴۴۱ (۲۰۰۵)
- [۹] R. Billinton, H. Chen and R. Ghajar, "Time-Series Models for Reliability Evaluation of Power Systems Including Wind Energy", *Microelectron. Reliab.*, Vol. ۳۶, No. ۹, ۱۹۹۶.
- [۱۰] Swierczynski, M.; Teodorescu, R.; Rasmussen, C. N.; Rodriguez, P.; Vekgaard, H., "Overview of the energy

بادی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. فرض می‌کنیم مزرعه بادی مورد مطالعه در شبکه نمونه RBTS قرار دارد. ضریب نفوذ توان بادی در سیستم قدرت را ۲۰ درصد در نظر می‌گیریم.

ابتدا یک واحد معمولی با توان ۲۰ MW از شبکه RBTS حذف می‌کنیم. در این حالت شاخص‌های کفایت LOLE و LOEE به ترتیب برابر با ۶/۱۲۹۹ و ۶۸/۳۱۷ می‌شوند. سپس به این سیستم مزرعه بادی و ذخیره‌ساز انرژی را اضافه کرده و شاخص‌های پایایی سیستم را محاسبه می‌کنیم. نتایج این مطالعه در جدول (۴) نشان داده شده است. به منظور محاسبه ظرفیت معادل از شاخص LOLE استفاده می‌کنیم.

جدول (۴): LOLE سیستم تست RBTS با حذف یک واحد معمولی و اضافه کردن مزرعه بادی به همراه ذخیره‌ساز انرژی

Index	LOLE (hr/yr)			
	۰	۱۰	۲۰	۵۰
Energy storage Capacity (MWh)	۰	۱۰	۲۰	۵۰
Wind farm Capacity (MW)	۰	۶/۱۲۹	۶/۱۲۹	۶/۱۲۹
۲۰	۴/۸۸۶	۴/۱۷۳	۳/۹۰۴	۳/۰۸۳
۴۰	۴/۱۲۹	۳/۴۸۲	۳/۲۷۵	۲/۱۴۸
۸۰	۳/۰۲۹	۲/۵۲۸	۲/۲۹۳	۱/۳۶۵
۱۲۰	۲/۶۳۹	۲/۰۳۸	۱/۶۲۸	۰/۹۳۲
۱۶۰	۲/۳۸۶	۱/۶۲۵	۱/۳۱۰	۰/۸۲۵
۱۸۰	۱/۹۰۲	۱/۲۰۲	۱/۰۲۷	۰/۷۳۹
۲۰۰	۱/۸۲۱	۰/۹۸۲	۰/۸۴۱	۰/۶۰۴

در جدول (۴) تاثیر اضافه کردن مزرعه بادی و ذخیره‌ساز انرژی به سیستم قدرت نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌کنیم، در صورتی که از مزرعه بادی تنها استفاده نماییم، هرگز شاخص LOLE برابر با ۱/۰۹۵۵ بدست نمی‌آید. اما با استفاده از مزرعه بادی به همراه ذخیره‌ساز انرژی با ظرفیت‌های ذخیره‌سازی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ مگاوات ساعت به ترتیب در مزارع بادی با ظرفیت‌های ۲۰۰، ۱۸۰ و ۱۲۰ به شاخص‌های پایایی مطلوب می‌رسیم. بنابراین

Available:

<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41869.pdf>

[۱۲] قادری شمیم احمد، حقی فام محمودرضا، "مدل سازی نیروگاه بادی با روش فازی- مارکوف در مطالعات قابلیت اطمینان"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۹، تابستان ۱۳۹۰.

storage systems for wind power integration enhancement," *Industrial Electronics (ISIE)*, ۲۰۱۰. *IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.۳۷۴۹,۳۷۵۶, ۴-۷ July ۲۰۱۰.

[۱۱] U.S. Department of Energy (۲۰۰۸, July), ۲۰% wind energy by ۲۰۳۰, Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply, Oak Ridge, TN. [Online].