

هماهنگی تولید واحدهای آبی تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، مزارع بادی و تولید سنتی انرژی با توجه به رشد سالیانه بار

شاهرخ شجاعیان^(۱) - هادی اکرمی^(۲)

(۱) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

(۲) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۹۱

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۲

خلاصه: با توجه به روند افزایش مصرف انرژی الکتریکی و تمایلات جهانی برای جایگزینی و تأمین توان مورد نیاز به وسیله منابع انرژی تجدید پذیر و ذخیره کننده‌های انرژی، در این مقاله الگوریتمی ابتکاری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای برنامه‌ریزی هماهنگ آن‌ها در سیستم قدرت پیشنهاد شده است. برای محاسبه میزان توان بادی و ذخیره ساز مورد نیاز با توجه به روند خروج تدریجی توان سنتی و رشد بار سالیانه ۵٪، از شاخص قابلیت اطمینان LOLE استفاده شده است. برای این منظور LOLE محاسبه شده در اولین سال به عنوان شاخص مرجع برای برآورد میزان مورد نیاز توان بادی و ذخیره ساز در سال‌های بعد به ازای رشد بار و خروج تدریجی توان سنتی به کار رفته و سپس به کمک روش مونت کارلو در هر سال ظرفیت‌های فوق برآورد شده‌اند. روش پیشنهادی بر روی شبکه تست IEEE-RTS پیاده سازی و شبیه سازی شده است.

کلمات کلیدی: توان بادی، ذخیره ساز هیدروالکتریک، قابلیت اطمینان، مونت کارلو، LOLE

۱- مقدمه

نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریکی از منابع تولید سنتی به علت محدودیت‌های منابع سوخت فسیلی از قبیل ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی و همچنین آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از استفاده این نوع منابع، تمایلات جهانی برای استفاده و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش داده است. با توسعه تکنیک‌های تولید برق بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر و روند رشد استفاده از این تکنیک‌ها به منظور تأمین توان مورد نیاز کشورها، بررسی و ارزیابی توان ارائه شده توسط این منابع به شبکه‌های قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی سریع‌ترین رشد تولید را داشته و به عنوان موفق‌ترین نوع انرژی تجدیدپذیر به رسمیت شناخته شده است. مطالعات زیادی برای مدل سازی رفتار سرعت باد به منظور برنامه‌ریزی و آنالیز قابلیت اطمینان سیستم‌های تبدیل انرژی باد و یا سیستم‌های قدرت ترکیبی شامل توان بادی صورت گرفته است [۱، ۲، ۳].

غالباً در مطالعات گذشته به منظور برآورد سرعت باد از روش‌های توزیع وایبل استفاده شده است [۴]؛ این در حالی است که این روش نمی‌تواند تغییرات زمانی سرعت باد را به طور پیوسته در یک مکان

خاص را به رسمیت بشناسد. مدل سری زمانی آرما^۱ با در نظر گرفتن تغییرات زمانی سرعت باد، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی سرعت باد می‌باشد [۱]. رابطه بین سرعت باد و توان خروجی از ژنراتورهای توربین بادی به وسیله یک رابطه غیرخطی، تحت عنوان منحنی توان باد^۱ ارائه می‌شود [۵]. تکنیک‌های متفاوتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل توان بادی ارائه شده است [۱۷-۴]. در مراجع [۹-۴] از تکنیک‌های تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در حضور نیروگاه بادی استفاده شده است.

روش‌های شبیه‌سازی ترتیبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل منابع ذخیره غیر متعارف در مراجع [۱۷-۱۰] ارائه شده است. مراجع [۱۵-۱۰] از مدل سری زمانی آرما به همراه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه‌های بادی به روش مونت کارلو استفاده کرده‌اند.

سیستم‌های قدرت شامل توان بادی به علت نوسانات توان بادی دارای محدودیت‌های زیادی در جذب توان بادی می‌باشند. در صورتی که بتوان در کنار منابع تولید بادی از منابع ذخیره‌سازی انرژی استفاده نمود تا حد زیادی می‌توان این محدودیت‌ها را رفع نمود. روش‌های متفاوتی برای ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد که با توجه به محدودیت‌ها

۲- مفاهیم پایه‌ای

وظیفه اصلی یک سیستم الکتریکی ارائه انرژی الکتریکی با سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان همراه با قیمت مناسب می‌باشد [۱۰]. قابلیت اطمینان یک سیستم، توانایی سیستم در انجام وظایف خود در یک بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود. به طور کلی قابلیت اطمینان سیستم‌ها، به دو جنبه کفایت و امنیت [۲۰] تقسیم می‌شوند.

مهم‌ترین مسئله در ارزیابی کفایت سیستم‌های قدرت شامل توان بادی، بررسی توانایی سیستم در تأمین بار مورد نیاز سیستم می‌باشد. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در سه بخش تولید انتقال و توزیع و به طور کلی در سطح متوالی HL^2_1 ، HL_2 و HL_3 تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به این که خرابی و یا خطا در بخش تولید باعث خروج کل سیستم می‌گردد، ارزیابی کفایت سیستم‌های قدرت در بخش تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا مطالعات انجام شده در این مقاله بر روی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه‌های بادی و منابع ذخیره کننده با استفاده از کفایت مرحله ۱ (HL I) است و شبکه انتقال و توزیع کاملاً قابل اطمینان فرض می‌شوند.

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید شامل نیروگاه‌های بادی، با تکنیک‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. روش تحلیلی و روش مشابه سازی، از مهم‌ترین تکنیک‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان به حساب می‌آیند و در روش‌های مشابه سازی غالباً از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) استفاده می‌شود که روش مورد استفاده در این مقاله نیز می‌باشد.

روش‌های تحلیلی از مدل‌های آماری و ریاضی برای توصیف المان‌های سیستم استفاده می‌کند و شاخص‌های خطا از حل مدل‌های ریاضی بدست می‌آیند. روش تحلیلی به راحتی نمی‌تواند روزشمار وقایع تصادفی و ارتباط بین بار، توان باد و شرایط شارژ و شارژ ذخیره‌سازها را که در ارزیابی قابلیت اطمینان بسیار مهم هستند، در نظر بگیرد. از طرف دیگر برای ارزیابی سیستم‌هایی که به تعداد زیادی از متغیرهای تصادفی بستگی دارند، شبیه‌سازی احتمالاتی یک تکنیک عملی و کاربردی می‌باشد.

روش مونت کارلو^۳ یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)، روش‌های متفاوتی را برای برآورد شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، به وسیله شبیه‌سازی فرایندهای واقعی و رفتار تصادفی سیستم فراهم می‌آورد.

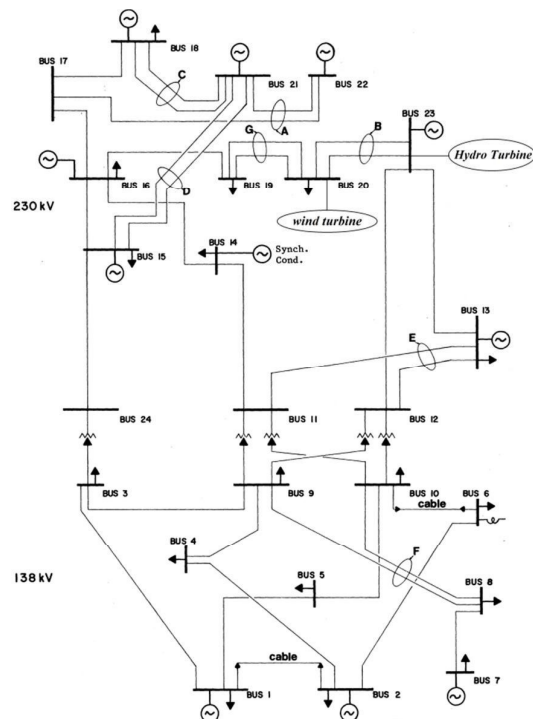
روش مونت کارلو، شاخص‌های قابلیت اطمینان را به وسیله شبیه‌سازی فرایندهای واقعی، و رفتار تصادفی سیستم، تخمین زده و در برنامه ریزی، طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تقریباً تمام ابعاد و احتمالات ذاتی سیستم را به حساب می‌آورد.

در دهه‌های اخیر به دلیل توسعه سریع ابزارهای محاسباتی، استفاده از روش مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت دارای روند رشد زیادی بوده است. دو روش عمده برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به روش شبیه سازی مونت کارلو وجود دارد که

و شرایط موجود در شبکه، نوع منبع ذخیره‌ساز برای ذخیره سازی انرژی الکتریکی تعیین می‌گردد. روش احتمالی برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم بادی ایزوله موازی با ذخیره‌سازی در باتری در [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۹] مدل عمومی احتمالاتی یک سیستم تبدیل انرژی باد (WECS) شامل ژنراتورهای بادی و ذخیره سازی در باتری ارائه شده است.

چون در بین منابع تجدید پذیر، تمایل جهانی بیشتر بر استفاده از واحدهای بادی بوده و در بین روشهای ذخیره‌سازی نیز روش تلمبه-ذخیره‌ای بیشترین طرفدار را داشته است، در مقاله حاضر، این دو ملاک مطالعات بوده‌اند. فرض دیگر این بوده که با توسعه تدریجی بار از اضافه کردن تولید سنتی اجتناب شده و سعی شود ضمن تمرکز بر نیروگاههای بادی به روند تدریجی خروج نیروگاه‌های سنتی (مثلاً به واسطه پایان عمر و یا اقتصادی نبودن) نیز پرداخته شود. برای این منظور برای مدل‌سازی سرعت باد سری زمانی آرما و برای محاسبه شاخص‌های LOLE و LOEE از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلوی تریبی استفاده شده است.

شبکه تست IEEE-RTS که در بسیاری از مطالعات به عنوان شبکه تست به کار رفته، در مطالعه حاضر نیز پس از افزودن واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای و بادی برای شبیه‌سازیها استفاده می‌شود. چون در این شبکه اطلاعات پیش فرضی برای رژیم باد وجود ندارد از اطلاعات بادی منطقه سوئیت کانت کشور کانادا برای این منظور استفاده شده است. تمامی شبیه سازی‌ها با کدنویسی در نرم‌افزار مطلب اجرا شده‌اند.



شکل (۱): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه
Fig. (1): Two-state model for a generating unit

خاص است. عملاً LDC تقاضای بار واقعی سیستم را به طور کامل تری نسبت به DPLVC ارائه می‌کند. با استفاده از اطلاعات ساعتی بار می‌توان مدل زمانی بار را به دست آورد. مقدار بار $L(t)$ در زمان t را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۴) به دست آورد.

$$L(t) = L_y \times P_w \times P_d \times P_h(t) \quad (4)$$

که در این رابطه، L_y پیک بار سالیانه، P_w درصد بار هفتگی در دوره پیک بار سالیانه، P_d درصد بار روزانه در دوره پیک بار هفتگی و $P_h(t)$ درصد بار ساعتی در دوره پیک بار روزانه است. با استفاده از مشخصات درصدی بار در یک دوره سالیانه، هفتگی و ۲۴ ساعته و به کمک رابطه‌ی (۴) می‌توان مدل ساعتی بار را برای یک سال شبیه‌سازی نمود. با توجه روند تغییرات بار در فصل‌ها، ماه‌ها، هفته‌ها، روزها و حتی ساعت‌ها، در نظر گرفتن مقدار ثابتی از بار در کلیه ساعات یک سال روند نادرستی خواهد بود. لذا در این مقاله با توجه به روند تغییرات بار در زمانهای فوق، از اطلاعات بار شبکه IEEE-RTS با پیک بار ۲۸۵۰ مگا وات برای شبیه‌سازی مدل بار استفاده شده است. در این مقاله روند رشد سالیانه ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۵- مدل ریسک سیستم

مدل ریسک سیستم از ترکیب مدل تولید و مدل بار سیستم به دست می‌آید. بنابراین با استفاده از این مدل می‌توان شاخص‌های خطای سیستم یعنی، انتظار از دست دادن بار $LOLE$ و انتظار از دست دادن انرژی $LOEE$ را به دست آورد. $LOLE$ تعداد ساعات قابل انتظار در یک سال است که مجموع تولید سیستم نتوانسته تقاضای بار سیستم را برآورد سازد. $LOEE$ مقدار انرژی است که سیستم به علت تقاضای بار بیش از ظرفیت موجود، نتوانسته تامین کند. برای مدل‌سازی تولید از روش مونت کارلو و مدل دو حالت مارکوف استفاده شده است. مدل بار استفاده شده در روش مونت کارلوی ترتیبی معمولاً در گام‌های یک ساعته مدل می‌شود ولی می‌توان آن را برای گام‌های کوچکتری نیز استفاده نمود. از ادغام مدل تولید و مدل بار مدل ریسک به دست می‌آید. شاخص‌های قابلیت اطمینان را می‌توان با استفاده از این مدل ریسک محاسبه نمود.

شاخص‌های $LOLE$ و $LOEE$ را می‌توان با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست آورد. برای سالهای نمونه (N) این شاخص‌ها به صورت زیر حساب می‌شوند:

$$LOLE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n t_i \quad (\text{hours/year}) \quad (5)$$

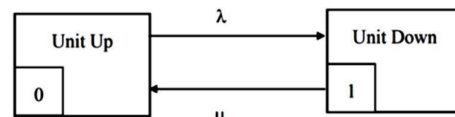
$$LOEE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n e_i \quad (\text{MWh/year}) \quad (6)$$

که در آن‌ها، t_i بار از دست رفته در زمان بار i ام، e_i انرژی تأمین نشده در زمان بار i ام، N تعداد کل سال‌های شبیه‌سازی شده و n تعداد بار می‌باشد. شاخص‌های $LOLE$ و $LOEE$ یک وضعیت کلی از توانایی سیستم در برآورد بار مورد نیاز سیستم ارائه می‌کنند.

شامل روش‌های ترتیبی و غیر ترتیبی می‌باشد. در روش ترتیبی کلیه رفتارهای زمانی سیستم به طور پیوسته لحاظ می‌شوند. این در حالی است که در روش غیر ترتیبی حالت‌های زمانی سیستم به طور گسسته در نظر گرفته می‌شود. بنابراین روش ترتیبی نسبت به روش غیر ترتیبی از لحاظ پیوستگی زمانی مناسب‌تر و دقیق‌تر می‌باشد [۲۱].

۳- ارزیابی مدل تولید

هر واحد تولید در سیستم‌های قدرت می‌تواند توسط یک مدل دو حالت و یا چند حالت مارکوف^۴ نشان داده شود. واحد تولید در مدل دو حالت مارکوف در یکی از دو حالت، کار کامل^۵ و یا حالت خروج اجباری^۶ قرار دارد. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده، نرخ گذار بین دو حالت λ و μ می‌باشد.



شکل (۲): مدل دو حالت واحد تولید (مدل دو حالت مارکوف)
Fig. (2): Two stode production unit model

در این شکل λ متوسط نرخ خرابی و μ متوسط نرخ تعمیرات واحد تولید است. در صورت داشتن نرخ خرابی (λ) و نرخ تعمیرات (μ) واحد، با استفاده از روابطه (۱) تا (۳) می‌توان مقادیر دسترس ناپذیری واحد (U)، دسترس پذیری^۷ (A) و نرخ خروج اجباری (FOR) واحد تولید را محاسبه نمود [۲۰].

$$U = \frac{1}{m+1} \quad (1)$$

$$A = 1 - U = \frac{m}{m+1} \quad (2)$$

$$FOR = \frac{\sum [Down_{time}]}{\sum [Down_{time}] + \sum [Up_{time}]} \quad (3)$$

۴- مدل بار

انواع متفاوتی از مدل‌های بار را می‌توان برای تقاضای انرژی یک سیستم در طول یک دوره زمانی خاص ارائه نمود. ساده‌ترین مدلی که برای بار می‌توان در نظر گرفت، استفاده از یک بار ثابت برای تمام دوره مورد مطالعه است و معمولاً در چنین شرایطی حداکثر بار سیستم، به عنوان بار ثابت در نظر گرفته می‌شود. منحنی تغییرات پیک بار روزانه ($DPLVC$)^۸ و منحنی تداوم بار (LDC)^۹ به طور گسترده‌ای به عنوان مدل‌های بار در ارزیابی کیفیت سیستم‌های تولید استفاده می‌شوند.

$DPLVC$ بر اساس تنظیم اطلاعات ساعتی پیک بار روزانه ایجاد شده و معمولاً به ترتیب نزولی و برای یک دوره یک ساله جمع‌آوری می‌شود. LDC از پیک بار روزانه استفاده می‌کند و مساحت زیر نمودار نشان دهنده مجموعه تقاضای انرژی یک سیستم، در طول یک دوره زمانی

۶- مدل سیستم‌های تبدیل انرژی باد

روش‌هایی که برای مدل‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی باد^{۱۳} (WECS) استفاده می‌شود شامل دو بخش، شبیه‌سازی اطلاعات سرعت باد و استخراج مدل قدرت تولیدی سیستم تبدیل انرژی^{۱۲} است. در گام نخست بایستی متغیر تصادفی سرعت باد به رسمیت شناخته شود. این مقدار تصادفی شامل مدل مناسب برای منعکس کردن موقعیت و همچنین همبستگی زمانی برای یک مکان جغرافیایی خاص می‌باشد. در قدم دوم رابطه غیر خطی بین قدرت خروجی ژنراتور توربین بادی^{۱۳} (WTG) و سرعت باد در نظر گرفته می‌شود. این رابطه با استفاده از پارامترهای عملیاتی WTG و تکنیک‌های مدل‌سازی منحنی توان به دست می‌آید.

۶-۱- مدل سرعت باد

قدرت خروجی از ژنراتور توربین بادی به سرعت باد در یک سایت خاص بستگی دارد. سرعت باد نسبت به زمان و مکان متغیر است و لذا سرعت باد در یک ساعت خاص، به سرعت باد در ساعت‌های قبل نیز وابسته است.

با استفاده از سری زمانی آرما^{۱۴} مدل سرعت باد را می‌توان با توزیع فصلی و روزانه، مشابه‌سازی کرد. بنابراین از این مدل می‌توان در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم‌های شامل WECS استفاده نمود. اطلاعات سری زمانی سرعت باد برای یک مزرعه بادی از یک مدل آرما مرتبه ی (n, n - 1) از رابطه ریاضی (۷) به دست می‌آید.

$$y_t = \sum_{i=1}^n \phi_i y_{t-i} + \alpha_t - \sum_{j=1}^{n-1} \theta_j \alpha_{t-j} \quad (7)$$

که در آن ϕ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, p$) و θ_j ($j = 1, 2, \dots, q$) به ترتیب پارامترهای اتورگرسیو (AR) و میانگین تحریک (MA) و α_t فرایند نویز سفید با متوسط صفر و واریانس σ_a^2 (یعنی $\alpha_t \in NID(0, \sigma_a^2)$) که NID نشان‌دهنده توزیع مستقل نرمال است) می‌باشند. به منظور برآورد مقادیر p, q, ϕ_i و θ_j در ARMA(p,q) از روش حداقل مربعات استفاده شده [۲۲] و مقدار α_t از یک مقدار حدس اولیه محاسبه می‌گردد. از پیشینه پانزده ساله اطلاعات ساعتی سرعت باد سایت بادی سویت کارنت^{۱۵} ایالت ساسکاچوان^{۱۶} کشور کانادا، برای به دست آوردن مدل سری زمانی آرما مربوطه استفاده شده است. اطلاعات ثبت شده مربوط به ارتفاع ده متری بوده و سرعت متوسط باد در این سایت تقریباً ۲۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. اطلاعات ساعتی سرعت باد در یک نمونه ۱۵ ساله از سال ۱۹۸۹ م. تا سال ۲۰۰۳ م. جهت مدل سازی در سری زمانی آرما استفاده شده است [۲۳].

با استفاده از اطلاعات فوق مدل سری زمانی آرما برای منطقه فوق به مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$y_t = 0.8782y_{t-1} - 0.0061y_{t-2} + 0.0265y_{t-3} + \alpha_t - 0.2162\alpha_{t-1} + 0.0091\alpha_{t-2} \quad (8)$$

$$\alpha_t \in NID(0, 0.55792^2)$$

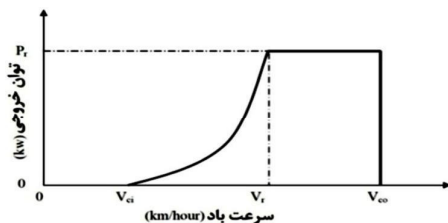
که در آن y_t مقدار سری زمانی در زمان t و α_t فرایند نویز سفید با متوسط صفر و واریانس 0.55792^2 می‌باشد. مدل سری زمانی فوق با ایجاد ارتباط بین سرعت باد در ساعت‌های متوالی، یک تصویر منطقی از رژیم بادی فراهم می‌کند. با استفاده از مدل سری‌های زمانی y_t سرعت باد (SW_t) برای سایت فوق از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$SW_t = m_t + \sigma_t \cdot y_t \quad (9)$$

که در این رابطه μ_t و σ_t به ترتیب پیشینه متوسط و انحراف استاندارد سرعت باد می‌باشند.

۶-۲- مدل ژنراتورهای توربین بادی

توان خروجی ژنراتورهای توربین بادی (WTG) بسیار متفاوت از توان خروجی ژنراتورهای سنتی می‌باشد. واحدهای تولید سنتی به جز مواقعی که دچار قطعی و یا خطا هستند می‌توانند توان خروجی ثابتی را در تمام زمان‌ها ارائه دهند. یکی از مؤثرترین پارامترها در توان خروجی ژنراتور توربین بادی، سرعت باد می‌باشد. یک رابطه غیر خطی بین توان خروجی ژنراتور توربین بادی و سرعت باد وجود دارد که توسط منحنی توان در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): منحنی توان از یک نمونه خاص WTG
Fig. (3): Power curve of a typical WTG unit

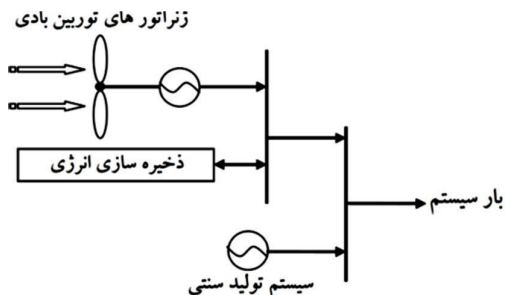
واحدهای WTG در سرعت باد Cut-in، شروع به تولید می‌کنند. این ژنراتورها وقتی که سرعت باد بین سرعت باد Rate و Cut-out است ماکزیمم توان (P_r) را در خروجی خود دارند. واحدهای WTG وقتی که سرعت باد به سرعت باد Cut-out می‌رسد به دلیل مسائل ایمنی به حالت خاموش یا به عبارت دیگر قفل می‌روند.

برای محاسبه توان خروجی ژنراتور توربین بادی از رابطه (۹) استفاده می‌شود. این رابطه بیان ریاضی منحنی توان می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه (۱۰) و سرعت باد شبیه‌سازی شده توان خروجی WTG شبیه سازی می‌گردد [۲۴]

$$P(SW_t) = \begin{cases} 0 & , 0 < SW_t \leq V_{ci} \\ (A + B \cdot SW_t + C \cdot SW_t^2) P_r & , V_{ci} < SW_t \leq V_r \\ P_r & , V_r < SW_t \leq V_{co} \\ 0 & , V_{co} < SW_t \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن P_r, V_{ci}, V_r, V_{co} به ترتیب ماکزیمم توان خروجی^{۱۷}، سرعت باد ورود^{۱۸}، سرعت باد ریت^{۱۹} و سرعت باد خروج^{۲۰} می‌باشند. مقادیر ثابت A، B و C با استفاده از V_{ci} و V_r طبق رابطه (۱۱)

به محدودیت‌های پایداری سیستم در شرایط ثابت تنها بخشی از توان مورد نیاز سیستم را می‌توان توسط توان بادی تأمین نمود. این محدودیت در شرایطی اعمال می‌شود که درصدی از کل بار شبکه به طور پیوسته بر عهده توان بادی قرار گیرد. هنگامی که مجموع توان بادی و توان سنتی برای پاسخ‌گویی به بار سیستم کافی نباشند انرژی ذخیره شده برای تأمین میزان بار، و تکمیل انرژی تولید شده، استفاده می‌شود.



شکل (۴): مدل مورد استفاده برای سیستم تولید سنتی - بادی شامل منابع ذخیره انرژی

Fig. (4): Basic model for a wind-conventional generating system including energy storage

۸- واحدهای برق - آبی

نیروگاه‌های برق-آبی قادرند به سرعت توان خروجی خود را تغییر دهند. از طرف دیگر توان خروجی از WTG کاملاً متغیر و تصادفی بوده و استفاده گسترده آن‌ها در شبکه‌های قدرت می‌تواند باعث ناپایداری شبکه گردد. در صورتی که بتوان بین تولیدی واحدهای WTG و برق-آبی هماهنگی ایجاد نمود، مقدار زیادی از محدودیت‌های استفاده از منابع تولید پیوسته توان بادی حل خواهد شد. از مدل واحدهای برق-آبی انرژی محدود شده به منظور بررسی مزیت‌های این واحدها در قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل توان بادی و چگونگی ایجاد هماهنگی بین این واحدها و مزارع بادی استفاده می‌شود. در این مقاله از دوسد و یا مخزن به عنوان ذخیره ساز انرژی الکتریکی استفاده شده است.

۸-۱- استفاده از دو مخزن و یا دو سد پیاپی به عنوان منابع ذخیره انرژی

در این مدل ذخیره‌ساز دو سد پیاپی و یا دو مخزن با حجم‌های بسیار زیاد برای این منظور استفاده می‌گردد. در طول دروه‌ای که مازاد انرژی تولید بادی وجود دارد، این انرژی با پمپ آب به مخزن بالایی برای استفاده در دوره کمبود انرژی ذخیره می‌گردد. با توجه به این که در هر منطقه میزان مشخصی از آب ورودی به سدها نیز از بارش باران و برف می‌باشد برای این منظور یک روند افزایش سالیانه آب در اثر باران و برف نیز برای سدها و مخازن فوق در نظر گرفته شده است. برای این

محاسبه می‌شوند [۵]. سرعت باد V_{ci} ، V_r و V_{co} به ترتیب برابر با $۱۴/۴$ و ۳۶ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت فرض شده است [۲۴].

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4 V_{ci} V_r \left[\frac{V_{ci} + V_r}{2 V_r} \right]^3 \right\}, \quad (11)$$

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

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

مقادیر ثابت A ، B و C برای توربین بادی به وسیله رابطه (۱۰) محاسبه و به ترتیب برابر $۰/۰۳۱۱$ و $-۰/۰۲۱۵$ و $۰/۰۱۳$ به دست می‌آید. در این مقاله تمامی واحدهای WTG در مزارع بادی یکسان و دارای نرخ خروج ثابت ۱ MW فرض شده‌اند. هر WTG در معرض یک رژیم باد مشابه فرض شده و تمام WTG یک توان خروج ثابتی را در یک دوره زمانی خاص تولید می‌کند.

۷- ارزیابی مدل‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل توان بادی و ذخیره سازی انرژی

ضریب نفوذ توان بادی در شبکه‌های قدرت به نسبت توان نصب شده کل به شدت رو به افزایش است و بسیاری از مزارع بادی بزرگ در سال‌های اخیر بر روی شبکه‌های قدرت قرار گرفته‌اند. توان خروجی واحدهای WTG معمولاً تصادفی بوده و نمی‌توان از آن‌ها به عنوان یک منبع ثابت در تأمین بار مورد نیاز استفاده کرد ولی در صورتی که از ذخیره کننده استفاده شود، می‌توان از آن‌ها به خوبی استفاده نمود. انواع مختلفی از تکنیک‌های ذخیره‌سازی به منظور بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت ارائه شده‌اند. بررسی تأثیر ذخیره‌سازی انرژی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های نسبتاً بزرگ شامل مقدار قابل توجهی از ظرفیت توان بادی بسیار مهم است. تجهیزات ذخیره ساز مواقعی که سیستم در تأمین بار مورد نیاز دچار مشکل می‌شوند، بسیار مفید و پر کاربرد می‌باشند.

هدف اصلی از اضافه نمودن تجهیزات ذخیره ساز در سیستم‌های تولید سنتی شامل توان بادی، بهبود بخشیدن نوسانات توان ناشی از واحدهای WTG می‌باشد. غالباً در عمل، مازاد انرژی منابع تولید سنتی ذخیره سازی نمی‌شود. مدل ارائه شده در شکل (۴) مازاد انرژی تولیدی ژنراتورهای توربین بادی را ذخیره و در مواقع کمبود توان به سیستم تحویل می‌دهد. تجهیزات ذخیره سازی انرژی در این مدل در مکان مزارع بادی واقع شده و از طریق یک خط اتصال به شبکه متصل می‌شوند.

هنگامی که ضریب نفوذ باد نسبتاً کم است و تأثیر ناچیزی بر روی عملکرد سیستم دارد، اولویت خدمات بار، با توان بادی می‌باشد. در این شرایط تمام توان بادی تولیدی توسط مزارع بادی، توسط سیستم جذب می‌شود. توانایی سیستم‌های قدرت در جذب انرژی بادی با افزایش ضریب نفوذ باد به علت شرایط پایداری سیستم، کاهش می‌یابد. هنگامی که سهم زیادی از بار سیستم در هر لحظه توسط توان بادی تأمین شود، احتمال ناپایدار شدن سیستم بالا می‌رود. بنابراین، با توجه

$$V_i = \begin{cases} V_{pi} & \text{if } V_{pi} \leq V_{max} \\ V_{max} & \text{if } V_{pi} > V_{max} \end{cases} \quad (15)$$

که در آن V_{pi} حجم آب موجود در مخزن قبل از این که آبی تخلیه (برای تولید یا مزاد ظرفیت سد) شود، V_{max} ماکزیمم حجم مخزن، R_{i-1} میزان آب استفاده شده برای تولید انرژی الکتریکی در طول دوره $i-1$ ام ساعت، S_i آب تخلیه شد در ساعت i ام است [۲۶]. در صورتی که میزان آب موجود در مخزن (V_i) از حداقل آب مجاز مخزن (V_{min}) بیشتر باشد، هد اصلی (H_i) آب در ساعت i ام را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه نمود [۲۶].

$$V_i = c + bH_i - aH_i^2 \quad (16)$$

که در آن a ، b و c ضرایب ثابت مدل هستند.

Tabale (2): Hydro plant data

جدول (۲): اطلاعات تجهیزات واحد برق - آبی

6	تعداد واحد های برق - آبی	
62.5 ^{MW}	ظرفیت تولید هر واحد	
0.8 p.u.	راندمان حالت ژنراتوری	
0.7 p.u.	راندمان حالت موتور	
180	ماکزیمم هد اصلی آب (m)	
0.00241	a	ضرایب ثابت مخازن
0.111	b	
2	c	
100	ماکزیمم مقدار آب (Mm ³)	
5	مینیمم مقدار آب (Mm ³)	
80	میزان اولیه آب (Mm ³)	
53	ماکزیمم نرخ تخلیه (m ³ /sec)	
10.6	مینیمم نرخ تخلیه (m ³ /sec)	
1.1	سطح مقطع کانال آب تغذیه توربین (m ²)	

هنگامی که توان خروجی از واحدهای تولید داخل سیستم از جمله حرارتی و توربین بادی برای پاسخ‌گویی بار سیستم کافی باشد واحدهای برق-آبی به مدار نمی‌آیند و مزاد انرژی توان بادی برای ذخیره‌سازی انرژی به موتورهای تحویل داده می‌شود. هنگامی که توان خروجی دیگر واحدهای تولید (سنی و بادی) برای تأمین بار کافی نباشند تعداد مناسبی از واحدهای آبی (K_a) برای تأمین بار مورد نیاز به مدار می‌آیند. توان خروجی از واحد برق-آبی (P_{hi}) با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آید [۲۶].

$$P_{hi} = gbH_i Q_s / 10^6 \quad (17)$$

$$Q_i = G \sqrt{2gH_i} \quad (18)$$

که در آن g ثابت گرانش زمین ($\frac{M}{sec^2}$)، β بازده کلی نیروگاه آبی، Q نرخ تخلیه پمپ، s وزن مخصوص آب $10^3 \frac{Kg}{m^3}$ ، G سطح مقطع کانال آب تغذیه توربین (m^2)، آب استفاده شده در ساعت i ام (R_i) با استفاده از رابطه‌ی (۱۹) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$R_i = 3600 K_a Q \quad (19)$$

اطلاعات پایه‌ای طرح و محدودیت‌های واحدهای تولید برق - آبی در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

منظور از یک مدل موتور - ژنراتوری استفاده شده است. در زمانی که کمبود انرژی وجود دارد آب از مخزن بالایی به سمت مخزن پایین‌تر جریان یافته و توان تولید می‌گردد. در این مقاله راندمان حالت موتور ۷۰٪ و راندمان حالت ژنراتوری ۸۰٪ فرض شده است. مشخصات فرض شده برای این منابع و یا سدها در جدول (۲) نشان داده شده است.

۸-۱-۱- مدل واحد برق آبی انرژی محدود

توان خروجی از واحدهای برق آبی با توجه به شرایط مخازن مشخص می‌شود. پتانسیل انرژی در مخازن آب ذخیره، و سپس توسط توربین‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. ورودی انرژی، با جریان آب به مخازن و خروجی انرژی با ژنراتورهای انرژی الکتریکی می‌باشد. آب ورودی به مخازن به طور عمده از پمپاژ از سد پایینی و بارش باران و برف به دست می‌آید. سه مدل از شرایط هوایی در جدول (۱) آورده شده که در این مقاله ما از بدترین حالت یعنی دوره خشک سالی استفاده نموده‌ایم.

Tabale (1): Mean value of water in-flow

جدول (۱): متوسط آب ورودی

Period	(Mm3) Wet	(Mm3) Dry	(Mm3) Normal
1	20.5	12.0	12.5
2	34.0	14.5	19.5
3	46.0	23.5	30.0
4	57.0	29.0	42.0
5	31.0	14.0	20.0
6	24.0	11.0	16.0
7	18.0	8.0	12.0
8	12.0	5.0	8.0
9	12.0	5.0	8.0
10	12.0	4.0	7.0
11	18.0	8.0	10.0
12	18.0	10.0	16.0
13	28.0	12.0	18.0

با استفاده از روش بوکس و مولر^{۱۸} [۲۵] فرض می‌شود که آب ورودی ($Z_j, j=1,2,\dots$) دارای یک توزیع نرمال در تمامی دوره‌های مورد استفاده است. در این مطالعه یک سال به ۱۳ قسمت تقسیم‌بندی شده و هر قسمت شامل ۶۷۲ ساعت با شرایط آب و هوایی مشابه می‌باشد. اطلاعات آب ورودی در سه وضعیت آب و هوایی در جدول (۱) نشان داده شده است.

میزان آب ورودی به مخازن ($I_i, i=1,2,\dots, 8736$) در هر ساعت به وسیله رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۲۶].

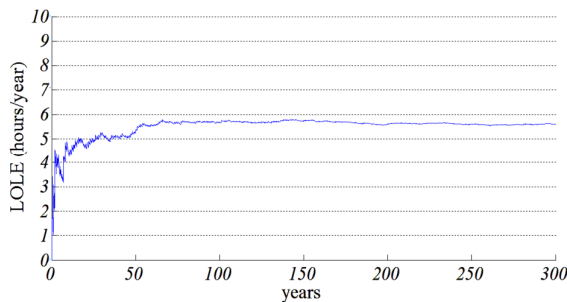
$$I_i = Z_j / 672 \quad (12)$$

میزان آب تخلیه شده از مخزن (S_i) و میزان آب موجود در مخزن (V_i) در ابتدای ساعت i ام با استفاده روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه می‌گردد.

$$V_{pi} = V_{i-1} - R_{i-1} + I_i \quad (13)$$

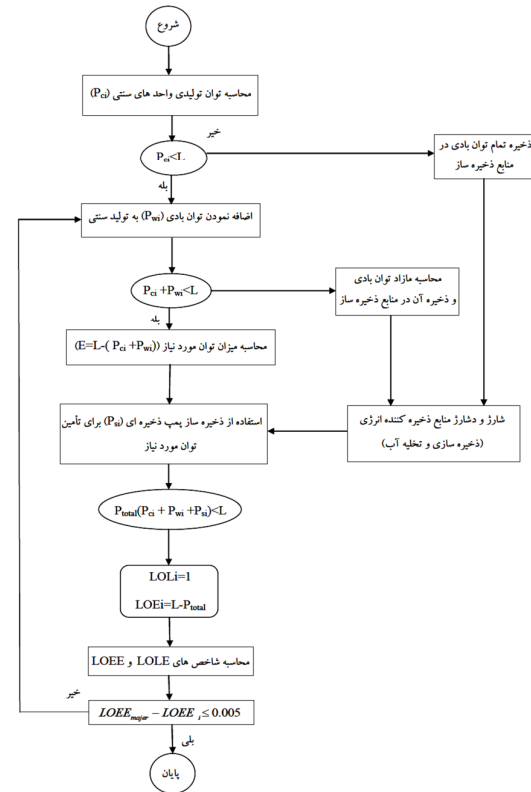
$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{if } V_{pi} \leq V_{max} \\ V_{pi} - V_{max} & \text{if } V_{pi} > V_{max} \end{cases} \quad (14)$$

مشخص شد، میزان تولید تمامی واحدها با هم جمع شده و مجموع توان تولیدی واحدهای سنتی (C_c) با توان بادی حاصل از تولید ۳۰۰ واحد ۱ مگا واتی WTG جمع شده و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان به قسمت مقایسه تحویل داده می‌شود. در قسمت مقایسه مجموع تولید سیستم (C_c+C_w) با بار سیستم (L) مقایسه و در صورتی که مجموع تولید پاسخگوی بار سیستم نباشد، انرژی تأمین نشده محاسبه و شمارنده یک واحد به تعداد ساعت‌هایی که بار تأمین نشده است اضافه می‌نماید. روند فوق آنقدر تکرار می‌شود تا شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده به همگرایی مناسبی برسند شاخص LOLE محاسبه شده در این مرحله در تمامی مراحل به عنوان شاخص مرجع در محاسبات می‌باشد. در شکل (۶) یک نمونه از همگرایی مونت کارلو برای همگرایی شاخص LOLE نشان داده شده است.



شکل (۶): روند همگرایی شاخص LOLE
Fig. (6): The convergence process of LOLE index

سپس با توجه به روند رشد بار سالیانه ۵ درصد میزان شاخص LOLE در هر مرحله حساب شده و با شاخص مرجع مقایسه می‌شود و ظرفیت توان بادی و ذخیره ساز مورد نیاز محاسبه می‌گردد. فرض شده است که در سال پنجم یکی از واحدهای ۴۰۰ مگا واتی و در سال هشتم یکی از واحدهای ۳۵۰ مگا واتی سنتی از مدار خارج شده و توان مورد نیاز از طریق توان بادی و ذخیره ساز تأمین می‌شود. منابع ذخیره ساز هیدرو الکتریک، مازاد انرژی تولیدی باد را در طول دوره پر بادی ذخیره و از آن در طول دوره کمبود انرژی استفاده می‌کنند. در جدول (۳) نمونه‌ای از روند محاسبه مقادیر مورد نیاز توان بادی و ذخیره ساز هیدرو الکتریک را نشان می‌دهد. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب میزان مورد نیاز توان بادی و ذخیره ساز، و میزان رشد بار به ازای روند کاهش توان سنتی را در طول دوره هشت ساله شبیه سازی نشان می‌دهند.



شکل (۵): فلوجارت کلی روند شبیه سازی
Fig. (5): Simulation flowchart

۹- شبیه سازی

بیان ریاضی بهینه سازی‌ای که در این مقاله باید انجام شود را می‌توان به طور خلاصه چنین نوشت:

$$\text{Minimize: } LOLE_i - LOLE_{base}$$

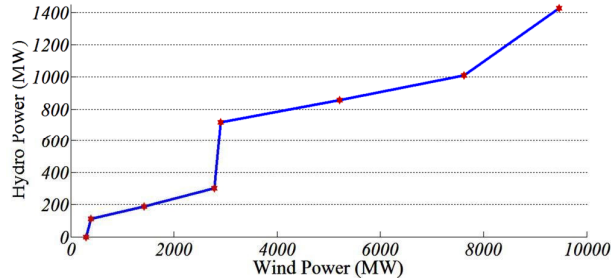
$$\text{S.T. } Loadgrowth = 0.5 \%$$

که در این جا $LOLE_i$ میزان LOLE در هر مرحله، $LOLE_{base}$ میزان LOLE محاسبه شده در اولین مرحله و $Loadgrowth$ میزان رشد بار سالیانه می‌باشد.

در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به روش مونت کارلو ترتیبی با مدل دو حالت مارکوف، تولید سیستم به صورت کاملاً احتمالاتی و بر مبنای FOR واحد تولید در نظر گرفته می‌شود.

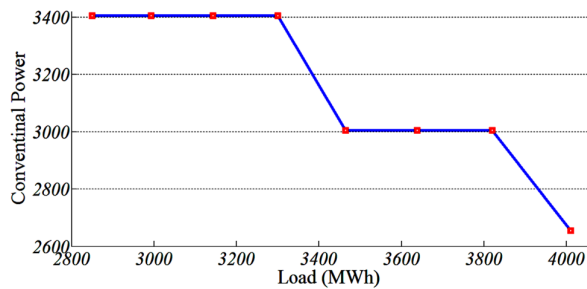
در شبیه سازی‌هایی که به روش مونت کارلو صورت می‌گیرد، ابتدا یک عدد با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ انتخاب می‌شود. این عدد بیانگر وضعیت سیستم برای حالت های تولید و یا خروج اجباری سیستم می باشد. عدد انتخاب شده با FOR سیستم مقایسه و در صورتی که عدد انتخابی از FOR سیستم بزرگتر باشد سیستم در وضعیت تولید (Up) قرار دارد و در حالتی که عدد انتخابی با FOR سیستم مساوی یا از آن کوچکتر باشد سیستم در وضعیت خروج اجباری (Down) قرار دارد. این روند برای تمامی واحدهای تولید سیستم به طور همزمان تکرار می‌گردد. پس از اینکه وضعیت تولید تمامی واحدها در مرحله اول

با مشکلاتی همچون افزایش بسیار زیاد تولید بادی همراه است. لذا برای چنین شرایطی پیشنهاد تأمین توان بادی تا حداکثر ۲۰ درصد کل توان شبکه قابل بررسی می‌باشد. کلیه مراحل فوق برای شبکه تست IEEE-RTS با موفقیت تست و استخراج گردیدند.



شکل (۷): توان بادی و ذخیره ساز مورد نیاز در LOLE ثابت

Fig. (7): The required amount of wind power and hydroelectric storage in fixed LOLE



شکل (۸): رشد بار سالانه در یک دوره هشت ساله

Fig. (8): Process of the annual load growth in 8 year

پی‌نوشت:

1. ARMA
2. Power curve
3. Hierarchical Levels
4. Monte-Carlo
5. Two-state or Multi-state Markov model
6. Up
7. Down
8. Availability
9. DPLVC (Daily Peak Load Variation Curve)
10. LDC (Load Duration Curve)
11. LOLE(Loss of Load Expectation)
12. LOEE(Loss of Energy Expectation)
13. WECS(Wind Energy Conversion System)
14. WTG(Wind Turbine Generator)
15. Swift Current
16. Saskatchewan
17. Rated power output
18. Box and Muller method
19. Head

Table (3): Required wind and water power in an 8 year period in fixed LOLE

جدول (۳): توان بادی و آبی مورد نیاز در یک دوره ۸ ساله در LOLE ثابت

سال	بار پایه	توان سنتی پایه	میزان توان بادی	میزان توان آبی	LOLE(d/y)
1	2850	3405	300	0	5.68
2	2993	3405	420	100	6.06
2	2993	3405	430	105	5.86
2	2993	3405	429	108	5.72
2	2993	3405	404	110	5.75
2	2993	3405	394	113	5.68
3	3143	3405	450	130	12.56
3	3143	3405	1450	180	6.12
3	3143	3405	1460	185	5.82
3	3143	3405	1449	187	5.73
3	3143	3405	1419	188	5.67
4	3300	3405	457	150	26.43
4	3300	3405	2457	250	8.33
4	3300	3405	2657	270	7.17
4	3300	3405	2797	300	5.82
4	3300	3405	2787	303	5.66
5	3465	3005	870	598	17.16
5	3465	3005	2870	698	6.48
5	3465	3005	2890	708	6.04
5	3465	3005	2900	713	5.85
5	3465	3005	2910	718	5.68
6	3638	3005	873	607	42.29
6	3638	3005	2873	707	16.34
6	3638	3005	4873	807	7.93
6	3638	3005	5193	847	6.03
6	3638	3005	5212	856	5.67
7	3820	3005	882	617	96.79
7	3820	3005	4882	817	19.86
7	3820	3005	6982	927	9.47
7	3820	3005	7582	987	6.57
7	3820	3005	7622	1011	5.66
8	4011	2655	1240	986	140.64
8	4011	2655	5240	1186	32.34
8	4011	2655	9240	1386	7.86
8	4011	2655	9440	1406	6.63
8	4011	2655	9469	1428	5.7

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله میزان مورد نیاز توان بادی و ذخیره‌ساز هیدروالکتریک به ازای خروج تدریجی نیروگاه‌های سنتی و رشد بار سالیانه ۵٪ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. روند کلی شبیه‌سازی‌ها و محاسبات بر اساس محاسبه شاخص LOLE به دست آمده در اولین مرحله بوده و میزان مورد نیاز توان بادی و ذخیره‌ساز بر اساس مقدار شاخص اولیه LOLE محاسبه و برآورد گردید. در جدول (۲) برای هر سال ۵ نمونه آورده شده تا روند تغییرات و برآورد میزان توان بادی و ذخیره ساز را به نمایش درآورد. همانگونه که در جدول (۲) قابل مشاهده است، میزان توان بادی و ذخیره‌ساز در شرایطی که توان بادی درصد قابل توجهی از بار را تأمین می‌کند به شدت رشد داشته و دلیل آن این است که ظرفیت نمایش داده شده در این جدول ظرفیت تولید حداکثری برای توان بادی است و در شرایط عدم وجود باد، توان بادی تولیدی صفر می‌باشد. بنابراین تأمین بار با شرایط فوق و با ذخیره‌سازی محدود

References

- [1] R. Billinton, H. Chen R. Ghajar, "Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy", *Microelectronics Reliability*, Vol. 36, No. 9, pp. 1253-1261, Sep. 1996.
- [2] K.C. Chou, R.B. Corotis, "Simulation of hourly wind speed and array wind power", *Solar Energy*, Vol. 26, No. 3, pp.199-212, 1981.
- [3] M. Blanchard, G. Desrochers, "Generation of auto-correlated wind speeds for wind energy conversion system studies", *Solar Energy*, Vol. 33, No. 6, pp.571-579, 1984.
- [4] Abouzahr, R. Ramakumar, "An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 6, No. 4, pp. 627-638, 1991.
- [5] P. Giorsetto, K.F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, No. 1, pp. 134-143, 1983.
- [6] X. Wang, H. Dai, R.J. Thomas, "Reliability modeling of large wind farms and electric utility interface systems", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 103, No. 3, pp. 569-575, March 1984.
- [7] R. Karki, P. Hu, "Wind power simulation model for reliability evaluation", *Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Saskatoon, May 1-4, pp. 541-544, 2005.
- [8] R. Karki, P. Hu, R. Billinton, "A simplified wind power generation model for reliability evaluation", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 21, No. 2, pp.533 – 540, June 2006.
- [9] R. Karki, P. Hu, R. Billinton, "Reliability evaluation of a wind power delivery system using an approximate wind model", 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle, UK, Sep. 2006.
- [10] W. Wangdee, "Bulk electric system reliability simulation and application", Ph. D. thesis, University of Saskatchewan, 2005.
- [11] R. Karki, R. Billinton, "Maintaining supply reliability of small isolated power systems using renewable energy", *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 148, No. 6, pp.530 - 534, 2001.
- [12] R. Karki, R. Billinton, "Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 19, No. 2, pp. 435-440, June 2004.
- [13] R. Billinton, G. Bai, "Generating capacity adequacy associated with wind energy", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol.19, No. 3, pp. 641-646, Sep. 2004.
- [14] R. Billinton, H. Chen, R. Ghajar, "A sequential simulation technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 11, No. 4, pp. 728-734, Dec. 1996.
- [15] R. Karki, R. Billinton, "Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 16, No. 4, pp. 368-373, Dec. 2001.
- [16] C. Singh, A. Lago-Gonzalez, "Reliability modeling of generation systems including unconventional energy sources", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, No. 5, pp.1049-1056, May, 1985.
- [17] G. Desrochers, M. Blanchard, S. Sud, "A Monte Carlo simulation method for the economic assessment of the contribution of wind energy to power systems", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 1, No. 4, pp. 50-56, Dec. 1986.
- [18] A.G. Bakirtzis, "A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy systems", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 7, No. 1, pp. 99-107, March, 1992.
- [19] S.H. Karaki, R.B. Chedid, R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of wind energy conversion systems", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 14, No. 2, pp. 217-224, 1999.
- [20] R. Billinton, R.N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 2nd Edition, Plenum Press, New York, 1996.
- [21] R. Billinton, W. Li, "Reliability assessment of electrical power systems using monte carlo methods", Plenum Publishing, New York, 1994.
- [22] S.M. Pandit, SM. Wu, "Time Series and System Analysis with Application", John Wiley & Sons, Inc, 1983.
- [23] Available at: " <http://www.climate.weatheroffice.gc.ca> "
- [24] Y. Gao, "Adequacy assessment of electric power systems incorporating wind and solar energy", M. Sc. Thesis, University of Saskatchewan, 2006.
- [25] S.A. Papanthanasious, N.G. Boulaxis, "Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems", *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 4, pp. 457-479, June 2006.
- [26] Po Hu, "Reliability evaluation of electric power systems including wind power and energy storage" Ph. D. thesis, Uni. of Saskatchewan, 2009.

