



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 4(1):39-51

Stochastic Expansion Planning of Energy Storage in Transmission Networks, Considering into Account the Limitations the Charge and Discharge Cycles and Depth of Discharge

Reza Ebrahimi Abyaneh¹, *PhD Student*, Javad Olamaei¹, *Associate Professor*, Seyed Mostafa Abedi¹, *Associate Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

Abstract:

As the penetration of renewable energy resources increases, as well as advances in battery technologies, optimal expansion planning of the high-capacity batteries in power systems has become important. In this manuscript, a new model for the stochastic development of the batteries in transmission networks is presented. In the proposed method, the production of the wind unit is probabilistically modeled based on scenarios. In this method, in addition to the conventional relationships in the formulation of the problem of optimal energy storage systems expansion planning, the limitation of charging and discharging capability of storage devices has also been addressed. In the proposed model, a new relationship is proposed to determine the capability of charging and discharging cycles of storage devices. Also, the relationship between the maximum capability of charge and discharge cycles and the depth of discharge is presented and added to the previous formulations. The nonlinear relations in the proposed model are linearized and become a linear problem. The optimization problem generated by GAMS software has been solved. In order to demonstrate the capability of the proposed method, this method has been implemented on the 14-bus IEEE test network, which the simulation results show its capability.

Keywords: Stochastic expansion planning, Batteries expansion, Charge and discharge cycles

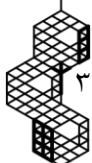
Received: 13 March 2024

Revised: 03 May 2024

Accepted: 09 June 2024

Corresponding Author: Dr. Javad Olamaei, j_olamaei@azad.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2025.1105147





مقاله پژوهشی

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

برنامه‌ریزی توسعه احتمالاتی ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه انتقال با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیکل شارژ و دشارژ و عمق دشارژ

رضا ابراهیمی ابیانه^۱، دانشجوی دکتری، جواد علمایی^۱، دانشیار، سید مصطفی عابدی^۱، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: با افزایش نفوذ منابع تولید تجدیدپذیر و همچنین پیشرفت تکنولوژی باتری‌ها، برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای با ظرفیت بالا در سیستم‌های قدرت اهمیت پیدا کرده است. در این مقاله، به ارائه یک مدل جدید برای توسعه احتمالاتی ذخیره‌سازها در شبکه‌های انتقال پرداخته شده است. در روش پیشنهادی، تولید واحد بادی بر مبنای سناریو و احتمالاتی مدل شده است. در این روش، علاوه بر روابط مرسوم در فرمول‌بندی مسأله توسعه بهینه ذخیره‌سازها، به مدل‌سازی محدودیت قابلیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها نیز پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی، رابطه‌ای جدید برای تعیین قابلیت سیکل‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، پیشنهاد شده است. همچنین رابطه بین حداکثر قابلیت سیکل‌های شارژ و دشارژ و عمق دشارژ ارائه شده و به فرمول‌بندی‌های قبل اضافه شده است. روابط غیرخطی در مدل پیشنهادی، خطی شده و به صورت یک مسأله خطی در آمده است. مسأله بهینه‌سازی تولیدشده توسط نرم‌افزار گمز حل شده است. به‌منظور نمایش توانایی روش پیشنهادی، این روش بر روی شبکه تست ۱۴ شین IEEE پیاده شده که نتایج شبیه‌سازی، توانایی آن را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی احتمالاتی، توسعه ذخیره‌سازها، سیکل‌های شارژ و دشارژ

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد علمایی، j_olamaei@azad.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2025.1105147



ذخیره‌سازهای انرژی از جمله باتری‌ها، به دلیل داشتن قابلیت‌های مختلف از جمله توانایی تولید و مصرف انرژی الکتریکی دارای کاربردهای مهمی در قسمت‌های مختلف سیستم‌های قدرت هستند [۱]. از جمله این کاربردها می‌توان به افزایش نفوذ منابع تولید تجدیدپذیر، هموار کردن و برش پیک بار، بهبود کیفیت توان و کاهش نیاز به تقویت شبکه اشاره کرد [۲-۴].

باتری‌ها یکی از قدیمی‌ترین ذخیره‌سازهای انرژی هستند که از گذشته کاربردهای بسیار زیادی داشته‌اند [۵، ۶]. در سالیان دور تنها از باتری‌ها در کاربردهای با ظرفیت توان و انرژی پایین استفاده می‌شده است. اما در حال حاضر با پیشرفت در تکنولوژی ساخت باتری‌ها، این نوع ذخیره‌سازهای انرژی شیمیایی در کاربردهای با ظرفیت توان و انرژی نسبتاً بالا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸، ۷]. با توجه به این موضوع، مطالعات برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری باتری‌ها در سیستم‌های قدرت اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است.

در نظر گرفتن و مدل‌سازی دقیق مشخصات فنی باتری‌ها در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری آن‌ها تأثیر قابل توجهی در میزان دقت و کارایی مطالعات انجام‌شده در این زمینه‌ها دارد. از جمله این مشخصات می‌توان به ظرفیت توان و انرژی، بازده انرژی، طول عمر، دشارژ خودی و ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ اشاره کرد [۹]. در سالیان اخیر مطالعات زیادی به برنامه‌ریزی توسعه باتری‌های در سیستم‌های قدرت پرداخته‌اند.

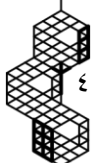
یک مدل چند مرحله‌ای احتمالاتی برای برنامه‌ریزی هماهنگ توسعه خطوط انتقال و باتری‌ها در [۱۰] پیشنهاد شده است. در این مدل، تقلیل ظرفیت ذخیره‌ساز ناشی از سیکل‌های شارژ و دشارژ و تأخیر ناشی از برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال لحاظ شده است. در [۱۱]، یک مدل سه‌سطحی برای بهینه‌سازی هم‌زمان خط انتقال و ذخیره‌سازهای انرژی پیشنهاد شده است. در این مدل، مکان و ظرفیت ذخیره‌ساز و هم‌چنین توسعه متمرکز خطوط انتقال انجام شده است. جان و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک روش برنامه‌ریزی هم‌زمان ذخیره‌ساز انرژی و خطوط انتقال امنیت مقید با در نظر گرفتن نفوذ بالای توان بادی پیشنهاد داده‌اند [۱۲]. در روش پیشنهادی، استراتژی کنترلی پیش‌بین چند مرحله‌ای هماهنگ برای باتری‌ها، ذخیره‌ساز تلمبه‌ذخیره‌ای، نیروگاه‌های بادی و حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. یک مدل احتمالاتی جدید به‌منظور توسعه هم‌زمان خطوط انتقال، منابع تولید بادی و ذخیره‌سازهای انرژی در سیستم قدرت در [۱۳]، پیشنهاد شده است. در این مقاله، عدم قطعیت ناشی از مزرعه بادی، قیمت نهایی محلی و بار در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

در مدل پیشنهادی در [۱۴] نیز حداقل کردن هزینه‌های روزانه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. به این‌منظور تلفات توان، قطعی توان واحد بادی، طول عمر باتری و هزینه انتشار آلودگی در تابع هدف در نظر گرفته شده است. یک فرمول‌بندی دوسطحی برای مسأله برنامه‌ریزی توسعه هماهنگ تولید و انتقال با در نظر گرفتن توسعه ذخیره‌سازهای انرژی در [۱۵] ارائه شده است. در مدل پیشنهادی برای ذخیره‌سازهای انرژی باتری و تلمبه‌ذخیره‌ای، قیود کوتاه و بلندمدت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. در [۱۶]، یک روش هماهنگ توسعه خطوط انتقال و جایابی باتری‌ها با در نظر گرفتن دیدگاه‌های امنیت و قابلیت اطمینان ارائه شده است.

در [۱۷] نیز، یک مدل برنامه‌ریزی آمیخته با اعداد صحیح برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال همراه با باتری‌ها پیشنهاد شده است. فرمول‌بندی ریاضی این مدل بر اساس استراتژی‌های اژانس‌های شبکه انتقال به‌منظور حداکثرسازی سودشان و با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری انجام شده است.

یک مدل سرمایه‌گذاری برای یافتن بهینه‌ترین ترکیب تجهیزات انعطاف‌پذیر غیر نیروگاهی مثل باتری‌ها، جبران‌سازهای سری کنترل‌شده ترستوری^۱ و خطوط انتقال در [۱۸] پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی از پخش بار بهینه AC خطی شده همراه با روش برش بندرز استفاده شده است. در [۱۹]، یک مدل به‌هم پیوسته چنددوره‌ای برای برنامه‌ریزی توسعه بلندمدت شبکه انتقال، تکنولوژی‌های تولید و ذخیره‌ساز انرژی باتری‌ها برای افزایش نفوذ منابع تولید بادی و خورشیدی ارائه شده است. مدل پیشنهادی به‌صورت یک مسأله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح فرمول‌بندی شده و توسط روش برش بندرز حل شده است.

در مطالعاتی که تا به‌حال بر روی برنامه‌ریزی توسعه باتری‌ها در شبکه‌های انتقال پرداخته شده است که تعدادی از آن‌ها در این قسمت مرور شده است سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری و وابستگی این سیکل‌ها به عمق دشارژ باتری مدل نشده است. در مطالعات انجام‌شده تا به‌حال برای طول عمر باتری‌ها، مدت زمان عمر باتری‌ها و همچنین تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری به‌عنوان یک پارامتر مشخص و ثابت در نظر گرفته شده است. در [۲۰]، به مدل‌سازی سیکل‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی پرداخته شده است ولی از شبکه قدرت که تأثیر به‌سزایی بر روی نتایج توسعه ذخیره‌سازها دارد صرف‌نظر شده است. وابستگی محدودیت سیکل‌های شارژ و دشارژ به

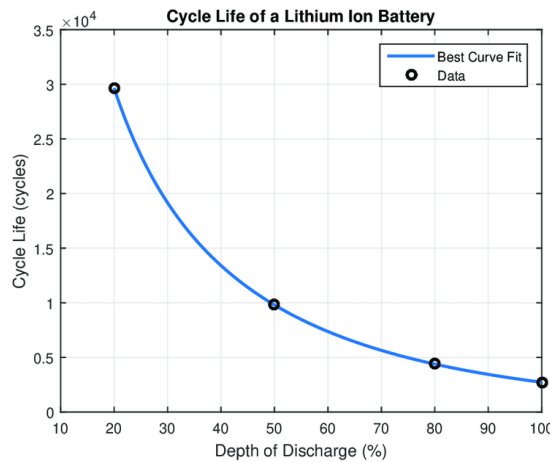




عمق دشارژ در زمان بهره‌برداری باتری‌ها از جمله مفاهیمی است که تأثیر قابل توجهی در نتیجه مطالعات برنامه‌ریزی توسعه باتری‌ها دارد که در این مقاله این مفهوم با در نظر گرفتن شرایط شبکه انتقال به‌عنوان چالش و نوآوری اصلی در نظر گرفته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور در این مقاله در ابتدا، به مدل‌سازی محدودیت‌های سیکل‌های شارژ و دشارژ پرداخته شده است. پس از آن در بخش بعد، فرمول‌بندی مسأله توسعه باتری‌ها با در نظر گرفتن سیکل‌های شارژ و دشارژ ارائه شده است. در بخش چهارم نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه ارائه و در نهایت در بخش پنجم، به نتیجه‌گیری مطالعات انجام‌شده در این مقاله پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی محدودیت سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری

باتری‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذخیره‌سازهای انرژی، علاوه بر دارا بودن قابلیت‌های فنی مختلف، با محدودیت‌های گوناگونی نیز روبرو هستند که در مقدمه مقاله به آن پرداخته شد. محدودیت‌های سیکل‌های شارژ و دشارژ، یکی از محدودیت‌های فنی پیش‌روی این تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی است که در این قسمت به آن پرداخته می‌شود و در ادامه در مسأله جایابی بهینه باتری‌ها در شبکه‌های انتقال در مدل خواهد شد. با بررسی رفتار باتری‌ها، می‌توان مشاهده نمود که عمق دشارژ ذخیره‌سازها با ظرفیت تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها رابطه عکس دارد. منحنی نمونه واقعی برای یک باتری لیتیوم‌یونی در شکل (۱) نمایش داده شده است [۲۱]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عمق دشارژ، تعداد حداکثر سیکل‌های شارژ و دشارژ کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای عمق دشارژ ۲۰ درصد تعداد سیکل‌ها ۳۰۰۰۰ و برای عمق دشارژ ۸۰ درصد به ۵۰۰۰ کاهش می‌یابد. با توجه به موارد مطرح‌شده، چگونگی بهره‌برداری باتری‌ها از نظر عمق دشارژ تأثیر قابل توجهی بر روی طول عمر آن‌ها خواهد داشت. این نکته به این معنا است که در مسأله برنامه‌ریزی توسعه باتری‌ها به‌منظور در نظر گرفتن قید طول عمر آن‌ها باید دو معیار مدت‌زمان طول عمر نامی آن‌ها و مدت زمان اتمام محدودیت سیکل‌های شارژ و دشارژ هم‌زمان لحاظ شود.



شکل (۱): منحنی محدوده شارژ و دشارژ نسبت به عمق دشارژ باتری لیتیوم‌یون

در روش پیشنهادی در این مقاله، برای مدل‌سازی محدودیت سیکل‌های شارژ و دشارژ، تعداد سیکل شارژ و دشارژ روزانه باتری با استفاده از رابطه زیر تعیین شده است:

$$N_{daily} = \frac{\sum_{t=1}^{24} \left(\eta^{ch} \times P_t^{ch} + \frac{1}{\eta^{dis}} \times P_t^{dis} \right)}{2 \times E^{max}} \quad (1)$$

که در این رابطه، N_{daily} ، تعداد سیکل شارژ و دشارژ روزانه، η^{ch} ، بازده شارژ، η^{dis} ، بازده دشارژ، P_t^{ch} ، توان شارژ در ساعت t ، P_t^{dis} ، توان دشارژ در ساعت t و E^{max} ، ظرفیت انرژی باتری است.

در مدل پیشنهادی در این مقاله، به‌منظور مدل‌سازی تأثیر عمق دشارژ بر روی تعداد سیکل‌های مجاز شارژ و دشارژ، منحنی حداکثر تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ به‌صورت تکه‌ای خطی مدل می‌شود. در شکل (۲)، چگونگی تقریب تکه‌ای خطی منحنی مورد بحث

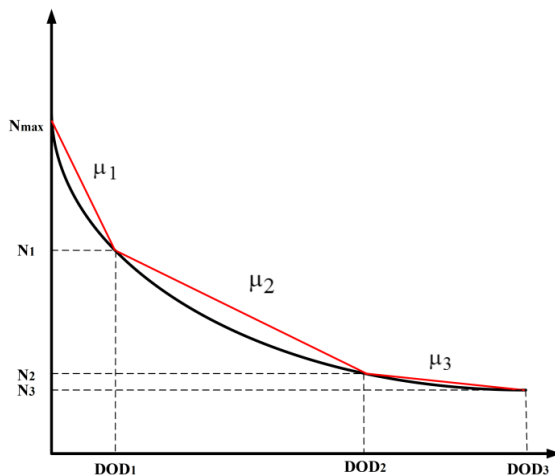


نمایش داده شده است. بدین ترتیب با استفاده از این شکل، تعداد حداکثر سیکل های شارژ و دشارژ با عمق دشارژ مرتبط خواهد شد. رابطه تعداد سیکل های مجاز شارژ و دشارژ باتری بر اساس مدل تکه ای خطی نشان داده شده در شکل (۲) با استفاده از روابط زیر تعیین می شود:

$$N = N_{\max} + \sum_{y=1}^Y \mu_y \times DOD^y \quad (2)$$

$$\overline{DOD^{y-1}} \leq DOD^y \leq \overline{DOD^y} \quad (3)$$

که در این رابطه، N تعداد مجاز سیکل های شارژ و دشارژ، N_{\max} ، تعداد حداکثر سیکل های شارژ و دشارژ با عمق دشارژ صفر، Y ، تعداد تکه های خطی، μ_y ، شیب تکه y ام و DOD^y ، عمق دشارژ در محدود تکه y ام است.



شکل (۲): منحنی تعداد سیکل های شارژ و دشارژ بر اساس عمق دشارژ

چگونگی مدل سازی محدودیت سیکل های شارژ و دشارژ در مسأله برنامه ریزی توسعه باتری ها در بخش بعد ارائه شده است.

۳- فرمول بندی برنامه ریزی توسعه باتری ها در شبکه انتقال

مدل پیشنهادی در این مقاله به برنامه ریزی احتمالاتی توسعه باتری ها در شبکه انتقال به منظور تعیین مکان و ظرفیت بهینه باتری ها با هدف حداقل سازی هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری می پردازد. بدین ترتیب تابع هدف مدل پیشنهادی بر اساس رابطه زیر تعیین می شود:

$$\min \sum_{s=1}^S \lambda_s \cdot \sum_{i=1}^N \left(\underbrace{C_{si}^c + AC_{si}^{c,OSM}}_1 + \underbrace{C_{si}^w + AC_{si}^{w,OSM}}_2 + \underbrace{C_i^s}_3 + \underbrace{C_{si}^s + AC_{si}^{s,OSM}}_4 + \underbrace{\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} Load_{sidt}^{cut} \times \alpha_{idt}^{cut}}_5 \right) \quad (4)$$

در این رابطه، s ، i ، d و t به ترتیب اندیس های سناریو، شین، روز و ساعت هستند. همچنین S ، تعداد سناریوها، N تعداد شین های سیستم و D تعداد روزهای نمونه در نظر گرفته شده در سال می باشد. از طرفی λ_s ، احتمال وقوع سناریوی s ، $Load_{sidt}^{cut}$ بار قطع شده در سناریوی s در شین i در روز d و ساعت t و α_{idt}^{cut} هزینه قطع بار در شین i در روز d و ساعت t است. در رابطه (۳)، ترم های ۱ تا ۸ به ترتیب، هزینه سالانه بهره برداری نیروگاه های مرسوم، هزینه ثابت سالانه تعمیر و نگهداری نیروگاه های مرسوم، هزینه سالانه بهره برداری نیروگاه های بادی، هزینه ثابت سالانه تعمیر و نگهداری نیروگاه های بادی، هزینه سالانه سرمایه گذاری در باتری ها، هزینه بهره برداری باتری ها، هزینه سالانه تعمیر و نگهداری باتری ها و هزینه پرداختی برای کاهش بارهای انعطاف پذیر در نظر گرفته می شود. هزینه سالانه بهره برداری از نیروگاه های مرسوم در هر شین با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:



$$C_{si}^c = \sum_{d=1}^D \frac{365}{D} \sum_{t=1}^{24} MC_i^c \times P_{sidx}^c + SU_{idx}^c + SD_{idx}^c \quad \forall s, \forall i \quad (5)$$

که MC_i^c هزینه نهایی تولید نیروگاه مرسوم در شین i و سناریوی s ، P_{sidx}^c تولید نیروگاه مرسوم در شین i ، سناریوی s در ساعت t در روز d و SU_{idx}^c و SD_{idx}^c به ترتیب هزینه روشن و خاموش شدن نیروگاه مرسوم در شین i در ساعت t در روز d هستند. در مدل پیشنهادی به منظور در نظر گرفتن شرایط تغییرات آب و هوایی فصلی در بار مصرفی و توان تولیدی بادی، روزهای مختلف d در سال به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. هزینه سالانه بهره‌برداری واحد تولید بادی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_{si}^w = \sum_{d=1}^D \frac{365}{D} \sum_{t=1}^{24} MC_i^w \times P_{sidx}^w \quad \forall s, \forall i \quad (6)$$

MC_i^w هزینه نهایی تولید نیروگاه بادی در شین i و سناریوی s ، P_{sidx}^w تولید نیروگاه بادی در شین i ، سناریوی s در ساعت t در روز d هستند. هزینه سالانه سرمایه‌گذاری در باتری‌ها مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_i^s = P_i^s \times AC^{P,s} + E_i^s \times AC^{E,s} + R_i^s \times AC^{R,s} \quad \forall i \quad (7)$$

P_i^s و E_i^s به ترتیب ظرفیت توان و انرژی باتری در شین i و $AC^{P,s}$ ، $AC^{E,s}$ و $AC^{R,s}$ به ترتیب هزینه سالانه سرمایه‌گذاری توان و انرژی باتری و هزینه سالانه جایگزینی باتری هستند. رابطه هزینه بهره‌برداری باتری با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_{si}^{s,o} = \sum_{d=1}^D \frac{365}{D} \sum_{t=1}^{24} (P_{sidx}^{s,ch} \times MC^{s,ch} + P_{sidx}^{s,dis} \times MC^{s,dis}) \quad \forall s, \forall i \quad (8)$$

که $MC^{s,dis}$ و $MC^{s,ch}$ به ترتیب هزینه نهایی شارژ و دشارژ باتری و $P_{sidx}^{s,ch}$ و $P_{sidx}^{s,dis}$ به ترتیب توان شارژ و دشارژ باتری در شین i در سناریوی s در ساعت t در روز d هستند. در ادامه قیود نیروگاه‌های مرسوم ارائه شده است [۲۲]:

$$\frac{P_i^c}{I_{idx}} \leq P_{sidx}^c \leq P_i^c \cdot I_{idx} \quad \forall s, \forall i, \forall d, \forall t \quad (9)$$

$$P_{sidx}^c - P_{sidx-1}^c \leq RU_i^c \cdot I_{idx} \quad \forall s, \forall i, \forall d, \forall t \quad (10)$$

$$P_{sidx-1}^c - P_{sidx}^c \leq RD_i^c \cdot I_{idx-1} \quad \forall s, \forall i, \forall d, \forall t \quad (11)$$

$$SU_{idx}^c \geq K_i^c \cdot (I_{idx} - I_{idx-1}) \quad \forall i, \forall t, \forall d \quad (12)$$

$$SD_{idx}^c \geq J_i^c \cdot (I_{idx-1} - I_{idx}) \quad \forall i, \forall t, \forall d \quad (13)$$

$$\sum_{t'=t}^{t+T_i^{on}-1} I_{idx} \geq T_i^{on} \cdot (I_{idx} - I_{idx-1}) \quad \forall i, \forall t \in \{1, \dots, 25 - T_i^{on}\}, \forall d \quad (14)$$

$$\sum_{t'=t}^{t+T_i^{off}-1} (1 - I_{idx}) \geq T_i^{off} \cdot (I_{idx-1} - I_{idx}) \quad (15)$$

$$\forall i, \forall t \in \{1, \dots, 25 - T_i^{off}\}, \forall d$$

که P_i^c حداقل ظرفیت تولید نیروگاه مرسوم در شین i ، P_i^c حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه مرسوم در شین i ، I_{idx} متغیر باینری روشن بودن نیروگاه مرسوم در شین i (یک به معنی روشن بودن و صفر به معنی خاموش بودن)، RU_i^c ، نرخ شیب افزایشی نیروگاه مرسوم در شین i ، RD_i^c ، نرخ شیب کاهش نیروگاه مرسوم در شین i ، K_i^c ، هزینه روشن کردن نیروگاه مرسوم در شین i ، J_i^c ، هزینه خاموش کردن نیروگاه مرسوم در شین i ، T_i^{on} ، حداقل زمان روشن ماندن نیروگاه مرسوم در شین i و T_i^{off} ، حداقل زمان خاموش ماندن نیروگاه مرسوم در شین i هستند. روابط (۹) تا (۱۵) به ترتیب تعیین کننده محدودیت تولید، محدودیت افزایش تولید، محدودیت کاهش تولید، هزینه خاموش کردن، هزینه خاموش کردن، محدودیت حداقل زمان روشن ماندن و محدودیت حداقل زمان خاموش ماندن نیروگاه‌های مرسوم هستند. قیود باتری‌ها شامل موارد زیر است [۲۳]:

$$\sum_{t=1}^{24} \eta^{ch} \cdot (P_{sidx}^{s,ch}) = \sum_{t=1}^{24} \frac{1}{\eta^{dis}} \cdot (P_{sidx}^{s,dis}) \quad \forall i, \forall s, \forall d \quad (16)$$

$$E_{sidx} = E_{sidx-1} + \eta^{ch} \cdot (P_{sidx}^{s,ch}) - \frac{1}{\eta^{dis}} \cdot (P_{sidx}^{s,dis}) \quad (17)$$

$$\forall i, \forall t \in [2, 24], \forall d, \forall s$$

$$(1 - D_o D_i) \cdot E_i^s \leq E_{sidx} \leq D_o D_i \cdot E_i^s \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (18)$$



$$0 \leq P_{sidx}^{s, ch}, P_{sidx}^{s, dis} \leq P_i^s \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (19)$$

$$P_i^s \leq SCP_i^{\max} \quad \forall i \quad (20)$$

$$E_i^s \leq SCE_i^{\max} \quad \forall i \quad (21)$$

که E_{sidx} انرژی ذخیره شده در باتری در شین i در سناریوی s در ساعت t در روز d ، DoD_i ، عمق دشارژ باتری در شین i ، SCP_i^{\max} حداکثر ظرفیت توان باتری قابل نصب در شین i و SCE_i^{\max} حداکثر ظرفیت انرژی باتری قابل نصب در شین i هستند. روابط (۱۶) تا (۲۱) به ترتیب تعیین کننده تعادل انرژی روزانه، محاسبه انرژی ساعتی، محدودیت انرژی، محدودیت توان، محدودیت ظرفیت توان و محدودیت ظرفیت انرژی باتری‌ها در شین‌های مختلف سیستم هستند. به منظور در نظر گرفتن محدودیت سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری‌ها در مدل پیشنهادی در این مقاله براساس توضیحات ارائه شده در بخش (۲)، در ابتدا محدودیت تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ برای باتری‌ها در هر شین بر اساس رابطه زیر اعمال می‌شود:

$$\sum_{d=1}^D \left(\frac{365}{D} \cdot N_{isid} \right) \leq N^{\max} \quad \forall i, \forall s \quad (22)$$

که در این رابطه N_{isid} ، تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری در شین i در سناریوی s در روز d و N^{\max} حداکثر تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ سالانه باتری هستند. لازم به ذکر است که تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ روزانه باتری (N_{isid}) با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود. از طرفی با توجه به متغیر در نظر گرفتن عمق دشارژ باتری بر اساس روابط (۲) و (۳)، بنابراین DoD_i به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و در نتیجه رابطه (۱۸) غیر خطی خواهد بود. به منظور خطی سازی این رابطه، در ابتدا یک متغیر کمکی جدید براساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$DE_i^s = DoD_i \cdot E_i^s \quad \forall i \quad (23)$$

بدین ترتیب، رابطه (۱۸) با رابطه زیر جایگزین می‌شود:

$$E_i^s - DE_i^s \leq E_{sidx} \leq DE_i^s \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (24)$$

پس از آن، محدودیت‌های زیر به عنوان قیود جدید برای باتری‌ها در نظر گرفته می‌شود:

$$\overline{DE_i^s} \leq DE_i^s \leq \overline{DE_i^s} \quad \forall i \quad (25)$$

$$\overline{DoD_i} \leq DoD_i \leq \overline{DoD_i} \quad \forall i \quad (26)$$

که $\overline{DE_i^s}$ و $\overline{DoD_i}$ به ترتیب حداقل و حداکثر متغیر کمکی در شین i و $\overline{DoD_i}$ و $\overline{DoD_i}$ ، به ترتیب حداقل و حداکثر عمق دشارژ باتری در شین i هستند. در مدل پیشنهادی در این مقاله، شبکه به صورت DC مدل می‌شود، بنابراین از معادلات پخش بار DC استفاده می‌شود. بدین ترتیب روابط پخش بار به صورت زیر خواهد بود:

$$\overline{\delta_i} \leq \delta_{sidx} \leq \underline{\delta_i} \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (27)$$

$$\delta_{sidx} = 0 \quad \forall i \in \text{slack}, \forall t, \forall d, \forall s \quad (28)$$

$$P_{sidx}^c + P_{sidx}^w + P_{sidx}^{s, dis} - P_{sidx}^D - P_{sidx}^{s, ch} + Load_{sidx}^{cut} = \sum_{j \in i} P_{sijdt} \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (29)$$

$$-P_{ij} \leq P_{sijdt} \leq P_{ij} \quad \forall k, \forall t, \forall d, \forall s, \forall f \quad (30)$$

$$P_{sijdt} = B_{ij} (\delta_{sijdt} - \delta_{sijdt}) \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (31)$$

$$Load_{sidx}^{cut} \leq P_i^{DR} \quad \forall i, \forall t, \forall d, \forall s \quad (32)$$

که δ_{sidx} ، زاویه ولتاژ در شین i در سناریوی s در ساعت t در روز d ، $\underline{\delta_i}$ و $\overline{\delta_i}$ ، حداکثر و حداقل زاویه ولتاژ شین‌ها، P_{sidx}^D ، بار مصرفی در شین i در سناریوی s در ساعت t در روز d ، P_{sijdt} ، فلوی توان خط بین شین‌های i و j در سناریوی s در ساعت t در روز d ، $\overline{P_{ij}}$ ، حداکثر فلوی توان خط بین شین‌های i و j ، B_{ij} ، سوسپتانس خط بین شین‌های i و j و P_i^{DR} ، حداکثر قابلیت پاسخ‌گویی بار در شین i هستند. روابط (۲۷) تا (۳۲) به ترتیب تعیین کننده محدودیت زاویه ولتاژ در شین‌ها، زاویه ولتاژ در شین اسلک، تعادل توان اکتیو در شین‌ها، محدودیت فلوی توان خطوط، محاسبه فلوی توان خطوط و محدودیت توان قطع شده در شین‌ها هستند.



در مدل پیشنهادی در این مقاله، عدم قطعیت‌های تولید نیروگاه بادی، در هر ساعت با استفاده از روش تولید/کاهش سناریو مدل می‌شود. در این روش به‌منظور تولید سناریوهای تولید نیروگاه بادی، سری‌های زمانی تولید، بر مبنای اطلاعات گذشته تعیین می‌شود. مدل آریمای یک مدل خطی است که برای نمایش سری زمانی قیمت‌ها استفاده می‌شود [۲۴]. برای تولید سناریوهای تولید بادی، در ابتدا براساس توابع همبستگی^۳ (ACF) و همبستگی جزئی^۴ (PACF) مربوط به مشاهدات قبلی، درجات مدل آریمای تعیین می‌شود. سپس ضرایب مدل آریمای مربوط به مدل انتخاب‌شده تخمین زده می‌شود. تخمین ضرایب با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی^۵ انجام می‌شود. پس از تعیین مدل آریمای و ضرایب آن، سناریوهای تولید بادی ایجاد می‌شود. تعداد زیاد سناریوها مسأله را پیچیده و حل آن را سخت می‌کند. بنابراین استفاده از یک روش مناسب برای کاهش تعداد سناریوها ضروری است. در این مقاله، از الگوریتم انتخاب به‌سمت جلوی سریع^۶ برای کاهش سناریو استفاده شده است. این روش بر مبنای فاصله کانتروپچ که یک فاصله احتمالاتی است استوار است [۲۵]. این الگوریتم بدون هیچ سناریویی شروع می‌شود. در هر تکرار سناریویی که بین مجموعه ابتدایی و انتخاب‌شده، فاصله کانتروپچ را حداقل کند انتخاب می‌شود. این الگوریتم زمانی به اتمام می‌رسد که تعداد مشخصی از سناریوها انتخاب شود. احتمال سناریوهای انتخاب‌نشده به نزدیک‌ترین سناریوی انتخاب شده منتقل می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی‌ها

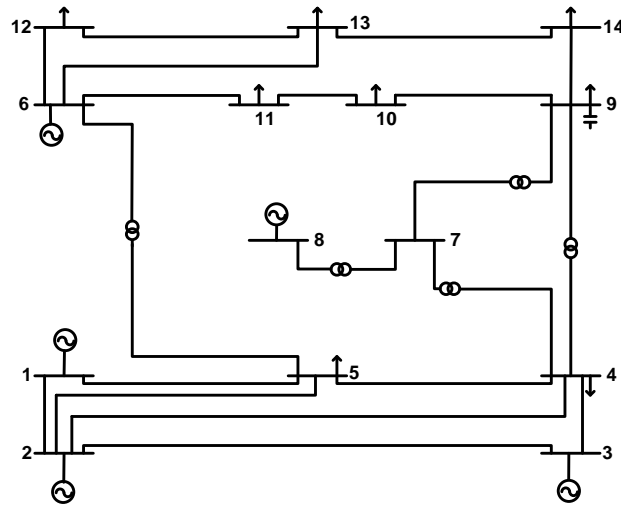
در این مقاله سیستم ۱۴ شینه استاندارد IEEE اصلاح‌شده نشان داده شده در شکل (۳) به‌منظور شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶]. در شین‌های ۱، ۲، ۳ و ۸ ژنراتورهای مرسوم با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) تعبیه شده است. در این جدول ظرفیت نیروگاه‌های اشاره شده ارائه شده است. در شین ۶، نیروگاه بادی با ظرفیت ۱۵۰ مگاوات تعبیه شده است. در شبیه‌سازی‌ها و مطالعات انجام‌شده چنین فرض شده است که تولید نیروگاه بادی متغیر بوده و بنابراین به‌صورت احتمالاتی مدل شده است. در مدل پیشنهادی، چهار روز نمونه در سال به‌عنوان روزهای نمونه سال، انتخاب و بار شین‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌عنوان ورودی به مدل اعمال شده است. دلیل مدل‌سازی این چنینی این است که با مدل‌سازی ۲۴ ساعتی بار می‌توان تبادل انرژی ساعتی باتری با سیستم را مدل نمود. در واقع در تعدادی از ساعات انرژی توسط باتری‌ها دریافت‌شده و شارژ می‌شوند. در ساعاتی این انرژی در باتری‌ها به‌صورت ذخیره باقی می‌ماند و در ساعاتی از روز باتری‌ها دشارژ شده و انرژی ذخیره‌شده را به سیستم تحویل می‌دهد. در جدول (۲) مشخصات باتری مورد مطالعه، نمایش داده شده است. منحنی محدوده شارژ و دشارژ نسبت به عمق دشارژ باتری مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است.

در مدل پیشنهادی، شبکه به‌صورت DC مدل شده است. در محاسبات نرخ تنزیل ۸ در نظر گرفته شده است. این پارامتر به‌منظور تعیین هزینه سالانه سرمایه‌گذاری در باتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. افق زمانی برنامه‌ریزی، ۱۵ ساله در نظر گرفته شده است. در شکل (۴)، سناریوهای کاهش یافته تولید واحد بادی برای یک روز نمونه نمایش داده شده است. سناریوهای تولید واحد بادی با استفاده از روش پیشنهادی در قسمت قبل تولید و پس از آن فرآیند کاهش سناریوها اجرا می‌شود. فرآیند تولید و کاهش سناریوهای واحد بادی در نرم‌افزار MATLAB اجرا شده است. از هزینه بهره‌برداری نیروگاه بادی صرف‌نظر شده است. مسأله بهینه‌سازی تولیدشده برای تعیین مکان و ظرفیت بهینه باتری‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است.

جدول (۱): مشخصات ژنراتورهای حرارتی موجود در سیستم

| شماره شین | توان حداقل | توان حداکثر | هزینه نهایی (دلار بر مگاوات/ساعت) | نرخ شیب افزایشی (مگاوات/ساعت) | نرخ شیب کاهشی (مگاوات/ساعت) |
|-----------|------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| ۱ | ۱۰ | ۱۶۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۴۰ |
| ۲ | ۲۰ | ۸۰ | ۳۵ | ۵۰ | ۵۰ |
| ۳ | ۲۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۵۰ | ۵۰ |
| ۸ | ۱۰ | ۱۵۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۴۰ |





شکل (۳): سیستم ۱۴ شینه استاندارد IEEE

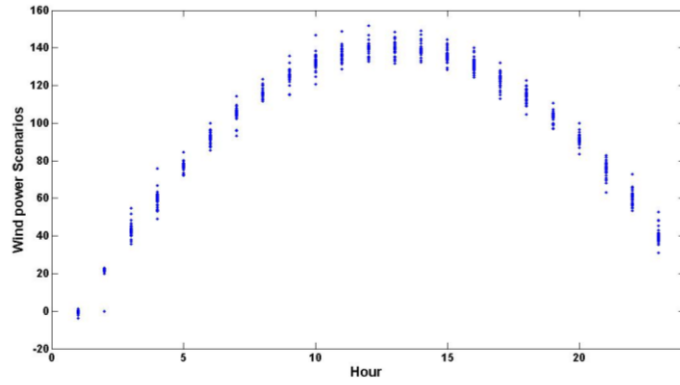
جدول (۲): مشخصات باتری مورد مطالعه

| هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (\$/MW/year) | ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ | طول عمر (years) | بازده (%) | هزینه سرمایه‌گذاری | | نوع ذخیره‌ساز |
|---|-----------------------------|-----------------|-----------|----------------------|--------------------|------------------|
| | | | | هزینه انرژی (\$/kWh) | هزینه توان (\$/kW) | |
| ۵۰۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۱۵ | ۹۰ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | باتری لیتیوم یون |

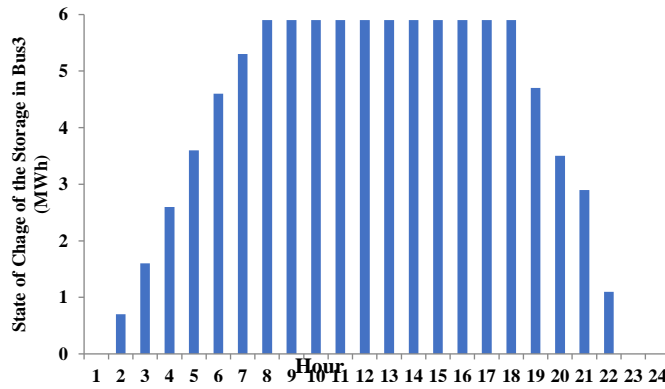
در جدول (۳)، نتایج برنامه‌ریزی توسعه باتری در شبکه مورد مطالعه ارائه شده است. در این جدول، مکان نصب باتری‌ها و همچنین ظرفیت توان و انرژی باتری در شین مورد نظر قابل مشاهده است. مطابق این جدول، شین‌های ۳، ۴ و ۶ برای نصب باتری‌ها پیشنهاد شده است. بیشترین ظرفیت توان و انرژی به شین ۶ و کمترین ظرفیت به شین ۴، اختصاص داده شده است. همچنین در این جدول، عمق دشارژ پیشنهادی برای هر کدام از باتری‌های در نظر گرفته شده ارائه شده است. به این ترتیب، عمق دشارژ ۷۹، ۷۵ و ۸۴ درصد به ترتیب برای باتری‌های در نظر گرفته شده در شین‌های ۳، ۴ و ۶ پیشنهاد شده است. با توجه به در نظر گرفتن منحنی شکل (۱) برای مدل‌سازی رابطه بین ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ و عمق دشارژ، می‌توان با استفاده از این شکل، ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ بهینه برای هر کدام از باتری‌ها را مشخص کرد. به عنوان مثال، برای باتری در نظر گرفته شده در شین ۴، عمق دشارژ ۷۵ درصد پیشنهاد می‌شود. مطابق منحنی ارائه شده در شکل (۱)، تعداد ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ برای این باتری حدود ۴۸۰۰ خواهد شد. به این ترتیب ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ برای باتری‌های شین‌های ۳ و ۶ به ترتیب حدود ۴۵۰۰ و ۴۳۰۰ خواهد بود. به منظور ایجاد دیدگاه بهتر در شکل‌های ۵ تا ۷ به ترتیب حالت شارژ باتری‌های در نظر گرفته شده برای شین‌های ۳، ۴ و ۶ در سناریوی با بیشترین احتمال برای یک روز نمونه، قابل مشاهده است. مطابق شکل (۵) باتری نصب شده در شین ۳، در ساعات ۲ تا ۸ شارژ و در ساعات ۱۹ تا ۲۳ دشارژ می‌شود. از شکل (۶) قابل مشاهده است که باتری موجود در شین ۴، در ساعات ۲ تا ۹ و همچنین ساعت ۱۲، شارژ و در ساعات ۲۱ تا ۲۴ دشارژ می‌شود. در نهایت می‌توان از شکل (۷) به این نتیجه رسید که باتری موجود در شین ۶، در ساعات ۸، ۱۰ و ۱۲، ۱۵ و ۱۸ شارژ و در ساعات ۲۰ تا ۲۴ دشارژ می‌شود.

جدول (۳): نتیجه برنامه‌ریزی توسعه باتری‌ها

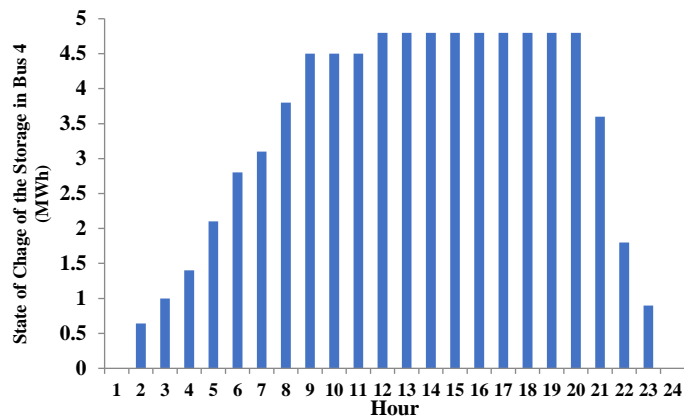
| شماره شین | | | |
|---------------------------|-----|-----|----|
| ۶ | ۴ | ۳ | |
| ظرفیت توان (مگاوات) | ۱/۱ | ۰/۸ | ۱ |
| ظرفیت انرژی (مگاوات‌ساعت) | ۶ | ۵ | ۶ |
| عمق دشارژ پیشنهادی (درصد) | ۸۴ | ۷۵ | ۷۹ |



شکل (۴): سناریوهای تولید نیروگاه بادی

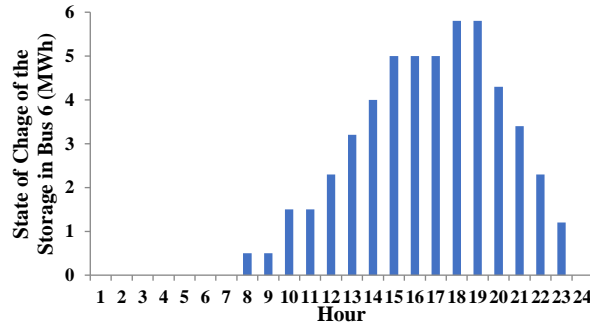


شکل (۵): حالت شارژ باتری در شین ۳ در روز نمونه



شکل (۶): حالت شارژ باتری در شین ۴ در روز نمونه





شکل (۷): حالت شارژ باتری در شین ۶ در روز نمونه

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جدید برای توسعه بهیته احتمالاتی باتری‌ها در شبکه انتقال با حضور منابع تولید مرسوم و بادی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، تولید نیروگاه بادی موجود به صورت برمبنای سناریو مدل شده است. در مسأله بهینه‌سازی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه احتمالاتی باتری‌ها علاوه بر تابع هدف و قیود مرسوم، سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز در نظر گرفته شده است. به این منظور علاوه بر ارائه رابطه برای تعیین تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری در بهره‌برداری‌های روزانه، رابطه بین قابلیت شارژ و دشارژ با عمق دشارژ باتری‌ها نیز در مسأله برنامه‌ریزی توسعه فرمول‌بندی شده است. بدین ترتیب در خروجی مدل پیشنهادی، علاوه بر تعیین مکان و ظرفیت بهینه باتری‌ها، عمق دشارژ بهینه باتری‌ها نیز در طول زمان بهره‌برداری از آن‌ها مشخص شده است.

مراجع

- [1] D. A. a. R. Rayudu, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 4, pp. 74-91, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.07.004.
- [2] T. R. Ayodele and A. S. O. Ogunjuyigbe, "Mitigation of Wind Power Intermittency: Storage Technology Approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 447-456, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.034.
- [3] A. Zahedi, "Maximizing Solar PV Energy Penetration Using Energy Storage Technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 866-870, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.011.
- [4] S. K. Kamali, V. V. T. N. A. Rahim, N. L. Panwar, H. Mokhlis, "Emergence of Energy Storage Technologies as the Solution for Reliable Operation of Smart Power Systems: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 135-165, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.056.
- [5] D.O. Akinyele, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 74-79, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.07.004.
- [6] D. Rastler, "Electricity energy storage technology options. A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits Energy," *Electric Power Research Institute (EPRI), Technical* 2010.
- [7] E. Alegria, E. Minear, and R. Lasseter, "CERTS microgrid demonstration with large-scale energy storage and renewable generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 937-943, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2286575.
- [8] A. Poullikkas, "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 778-788, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.017.
- [9] H. Doughty, C. Butler, P.A. Akhil, A.H. Clark, and D. Boyes, "Batteries for large-scale stationary electrical energy storage," *The Electrochemical Society Interface, Fall*, 2010, doi: 10.1149/2.F05103if.





- [10] T. Qiu, Y. Wang, et al., "Stochastic Multi-Stage Co-Planning of Transmission Expansion and Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, pp. 643-651, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2553678.
- [11] Y. Dvorkin, Y. Wang, et al., "Co-planning of Investments in Transmission and Merchant Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 245-256, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2705187.
- [12] W. Gan, J. Fang, et al., "Security constrained co-planning of transmission expansion and energy storage," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 383-394, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.192.
- [13] S. Mahmoudi, and B. Alizadeh, "Transmission and energy storage—expansion planning in the presence of correlated wind farms," *International Transactions Electronic Energy Systems*, vol. 29, pp. 1-14, January 2019, , doi: 10.1002/2050-7038.2840.
- [14] Y. Zhang, F. Luo, Y. Zheng, K. Meng, and K. Po Wong, "Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 1105–1113, May 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0542.
- [15] I. Gonzalez-RomeroSonja, "Proactive transmission expansion planning with storage considerations," *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, April 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.02.006.
- [16] M. Kazemi, "An integrated transmission expansion planning and battery storage systems placement - A security and reliability perspective," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 134, pp. 107329, January 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107329.
- [17] C. A. Mora, and E. R. Trujillo, "Mixed-Integer Programming Model for Transmission Network Expansion Planning with Battery Energy Storage Systems (BESS)," *Energies*, vol. 13, pp. 4386, August 2020, doi: 10.3390/en13174386.
- [18] Z. Luburic, and M. Carrion, "Transmission Expansion Planning Model Considering Battery Energy Storage" *TCSC and Lines Using AC OPF, IEEE Access*, vol. 8, pp. 203429–203439, November 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036381.
- [19] M. Moradi-Sepahvand, "Integrated expansion planning of electric energy generation, transmission, and storage for handling high shares of wind and solar power generation," *Applied Energy*, vol. 298, pp. 117137, September 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117137.
- [20] R. Ebrahimi Abyaneh, and S. M. Abedi, "Probabilistic Expansion Planning of Energy Storage Systems Considering the Effect of Cycle Life," *Sustainability*, vol. 15, pp. 1181, June 2023, doi: 10.3390/su151511814.
- [21] K. R. Mallon, and B. Fu, "Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan," *Energies*, vol. 10, pp. 943, July 2017, doi: 10.3390/en10070943.
- [22] F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Unit commitment with probabilistic spinning reserve and interruptible load considerations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 388-397, anuary 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2008675.
- [23] E. Hajipour, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic Capacity Expansion Planning of Remote Microgrids with Wind Farms and Energy Storage," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 491-498, April 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2376356.
- [24] M. Hosseini-Firouz, "Optimal offering strategy considering the risk management for wind power producers in electricity market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 359-368, July 2013, , doi: 10.1016/j.ijepes.2013.01.015.
- [25] Z. Tan, H. Li, J. Li, and H. Zhang, "A two-stage scheduling optimization model and solution algorithm for wind power and energy storage system considering uncertainty and demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 1057–1069, December 2104, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.061.
- [26] L. Huaiwei, "Power system Harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 22, pp. 15-23, January 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2006.887957.



-
- ¹ Thyristor-controlled series compensators (TCSC)
 - ² Autoregressive integrated moving average (ARIMA)
 - ³ Autocorrelation function
 - ⁴ Partial autocorrelation function
 - ⁵ Maximum likelihood
 - ⁶ Fast forward

