Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Integrated generation and transmission line expansion planning considering reactive power in the presence of uncertainty of wind farms and FACTS devices

Ehsan Akbari[1], *Assistant professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.
e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract:
In this paper, the Generation and Transmission Expansion Planning (G&TEP) problem is presented considering environmental pollution with the presence of wind units and FACTS devices. The objective function of this problem is equal to maximizing the profit of the investors in the generation and transmission sector, and the constraints of the problem include the AC power flow equations, wind units, FACTS devices, system operation constraints, and environmental pollution. The basic problem model is a nonlinear mixed integer problem, which will lead to complex problems in solving the problem. Therefore, this paper will present a mixed integer linear problem (MILP) model equivalent to the basic problem using conventional linearization methods. Finally, the proposed problem is applied to the test network using GAMS software, and then the capability of the problem is evaluated.

Keywords: Generation and Transmission Expansion Planning, linear AC power flow, wind unit, FACTS devices.

Received: 7 Dec. 2024
Revised: 20 Jan 2025
Accepted: 4 Feb. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Ehsan Akbari

Citation: E. Akbari, “Integrated generation and transmission line expansion planning considering reactive power in the presence of uncertainty of wind farms and FACTS devices”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 23-17, Ferbruary 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و خطوط انتقال با در نظر گرفتن توان راکتیو در حضور عدم قطعیت مزارع بادی و ادوات FACTS

احسان اکبری[1]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال (**G&TEP**) با در نظر گرفتن آلودگی زیست محیطی با حضور واحدهای بادی و ادوات **FACTS** ارائه می‌شود. تابع هدف این مسأله برابر با بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذاران بخش تولید و انتقال است و قیود مسأله مذکور شامل معادلات پخش توان **AC**، واحدهای بادی، ادوات **FACTS**، محدودیت بهره‌برداری سیستم و آلودگی زیست محیطی است. مدل مسأله پایه به‌صورت غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح است که به دنبال آن حل مسأله با پیچیدگی‌های روبه‌رو خواهد بود. لذا این مقاله، با استفاده از روش‌های خطی‌سازی مرسوم، مدل مسأله خطی آمیخته با اعداد صحیح (**MILP**) معادل با مسأله پایه را ارائه خواهد داد. در نهایت مسأله پیشنهادی با استفاده از نرم افزار **GAMS** بر روی شبکه تست اعمال شده و سپس قابلیت مسأله ارزیابی می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال، پخش توان AC خطی‌سازی شده، واحد بادی، ادوات FACTS.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر احسان اکبری
نشانی نویسنده مسئول: بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025

علائم

متغیرها

C_G, C_T	هزینه برنامه‌ریزی واحدهای تولید و خطوط انتقال ($)
bf	سوسپتانس ادوات FACTS سری (.p.u)
FA	متغیر باینری متناظر با احداث ادوات FACTS
FMP	قیمت خدمات خط انتقال ($/MWh)
LMP	قیمت حاشیه‌ای محلی ($/MWh)
PG, QG	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr) واحد تولید
PL, QL	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr) خط انتقال
PW	توان اکتیو (MW) مزرعه بادی
QF	توان راکتیو (MVAr) اداوات FACTS موازی
R_G, R_T	درآمد واحدهای تولید و خطوط توزیع ($)
$V, \Delta V, \theta$	دامنه (.p.u)، انحراف (.p.u) و زاویه (رادیان) ولتاژ
X	متغیر باینری متناظر با احداث خط انتقال
y	نتغیر باینری متناظر با واحد تولید

پارامترها

AF	ماتریس تلاقی ادوات FACT موازی با شین
AG, AL	ماتریس تلاقی واحد تولید با شین، ماتریس تلاقی خط انتقال با شین
b, g	سوسپتانس و رسانایی خط انتقال (.p.u)
BF^{max}	حداکثر سوسپتانس اداوات FACTS سری (.p.u)
CG, CL, CF	هزینه احداث واحد تولید، خط انتقال و ادوات FACTS ($)
du	بازه بهره‌برداری
E^{max}	حداکثر آلایندگی (ton)
PD, QD	بار اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr)
P_{rate}	توان نامی مزرعه بادی (MW)
SF^{max}	حداکثر توان ظاهری ادوات FACTS موازی (MVA)
SG^{max}	حداکثر توان واحد تولید (MVA)
SL^{max}	حداکثر توان ظاهری اخط انتقال (MVA)
V^{min}, V^{max}	حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ (.p.u)
$W, W_{ci}, W_{co}, W_{rate}$	سرعت بادی، سرعت باد آستانه وصل، سرعت باد آستانه قطع، سرع باد نامی (m/s)
α, β	ضرایب آلایندگی واحد تولید
λ	
η_f	
π	

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

f	ادوات FACTS موازی
j	اندیس کمکی متناظر با باس

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

n, t, w	باس، زمان و سناریو
m	ضلع در چند ضلعی منتظم
φ_f	مجموعه ادوات FACTS موازی
$\varphi_n, \varphi_t, \varphi_w$	مجموعه باس، زمان و سناریو

۱- مقدمه

این برنامه‌ریزی توسعه تولید و خطوط انتقال (G&TEP)[۱] مسأله‌ای است که به دنبال تعیین نوع، مکان نصب و ظرفیت تولید و انتقال است که این موارد با توجه به اهداف اقتصادی سرمایه‌گذاران این بخش معیین خواهند شد [۱]. علاوه بر این، برنامه‌ریزی بایستی به گونه‌ای باشد که سطوح قابلیت اطمینان بحرانی برآورده شود [۲]. به عبارتی، رشد جمعیت و حضور بارهای الکتریکی جدید مانند خودروهای الکتریکی در سیستم قدرت موجب شده که میزان تقاضای انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته باشد. همچنین این روند در سال‌های آینده نیز وجود دارد. لذا پیش‌بینی می‌شود که ساختار فعلی سیستم قدرت پاسخ‌گویی بارهای اضافه شده نباشد. از این‌رو نیاز به برنامه‌ریزی بلند مدت توسعه بخش‌های مختلف سیستم قدرت است که مهمترین آنها برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال است که در این صورت از خاموشی‌های احتمالی در سال‌های آینده جلوگیری می‌شود [۳].

در [۴-۶]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید[۲] (GEP) بررسی شده است. در [۴]، یک مسأله چند هدفه GEP ارائه شده است که تابع هدف آن شامل دو بخش است. بخش اول تابع هدف به هزینه‌های احداث و بهره‌برداری واحدهای تولید اشاره دارد و بخش دوم آن نیز اثرات محیط زیست را در نظر گفته است. براساس نتایج مرجع مذکور، واحدهای تولید انتخاب می‌شوند که هم هزینه احداث و بهره‌برداری پایین داشته باشند و هم دارای اثرات زیست محیطی مخربی نباشند. بطور مشابه در [۵]، اثر برخی از بیشترین محرک‌های خاص سیستم‌ها را روی برنامه‌ریزی تولید در نظر گرفته است. در [۶]، یک مدل GEP جامع در جهت کاهش گاز دی اکسیدکربن به‌صورت اقتصادی پیشنهاد شده است. همچنین به منظور ساده‌سازی مدل پیشنهادی، یک رویکرد مدل شده توافق شده ارائه شده است. در [۷-۱۰]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه انتقال[۳] (TEP) بررسی شده است. در [۷] مدل مسأله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با در نظر گرفتن قیود امنیت سیستم به صورت مسأله خطی آمیخته با اعداد صحیح ارائه شده است. در این مرجع، معادلات پخش توان DC، تلفات شبکه، سرمایه گذاری خطوط انتقال و هزینه تولید توان نیروگاه ها به عنوان معادلات مسأله در نظر گرفته شده اند که تابع هدف آن کمینه‌سازی هزینه احداث خطوط انتقال و هزینه بهره برداری واحدهای تولید است. همچنین این مرجع با استفاده از روش تکه خطی روابط تلفات شبکه و توابع هزینه واحدهای تولید را به معادلات خطی آمیخته با اعداد صحیح تبدیل کرده است. در [۹]، برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با استفاده از معادلات پخش توان DC و پخش توان AC مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج به دست آمده نشان دهنده سادگی معادلات مسأله با استفاده از پخش توان DC است. همچنین سرعت اجرایی برنامه با استفاده از پخش توان DC سریعتر از معادل آن با استفاده از پخش توان AC است. مرجع [۱۰] برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با استفاده از معادلات پخش توان AC به همراه جبران کننده‌های موازی را بیان می کند. در این مرجع برای حل مسأله از روش تکامل PSO استفاده شده است. همچنین در مرجع [۱۱] از الگوریتم تکاملی معادلات تفاضلی برای حل مسأله AC برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال استفاده شده است.

در [۱۲] مسئله G&TEP ارائه شده است. مرجع [۱۲] یک روش برنامه‌ریزی استاتیک معرفی کرده است که مدل کمترین انحراف هزینه را از نقاط ابتدایی دارد. همچنین بیشتر تحقیقات که روی مسئله G&TEP کار کرده‌اند از رویکرد برنامه‌ریزی خطی آمیخته به عدد صحیح[۴] (MILP) استفاده نموده‌اند. در [۱۳] یک مسأله چندهدفه براساس MILP برای حل مسأله G&TEP ارائه شده است. آن همزمان دو هدف را کمینه می‌کند که عبارتد از: هزینه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری، آلودگی. در مرجع [۱۴]، مسئله G&TEP برای افق برنامه‌ریزی خاصی برای تجهیزات سیستم با هدف کمینه کردن هزینه‌های بهربرداری و سرمایه‌گذاری ارائه شده است. یک رویکرد تجزیه برای کاهش زمان محاسبات مسئله G&TEP در مرجع [۱۵] اعمال شده است. در این مرجع مسئله بوسیله برنامه‌ریزی خطی[۵] (LP) حل می‌شود. یک رویکرد تجزیه برای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025

کاهش زمان محاسبات مسئله SVC در مرجع [۱۶] اعمال شده است. در [۱۷] یک مسأله چندهدفه با نفوذ بالای منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن قید حفاظت ریزشبکه ارائه شده است.

در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال با در نظر گرفتن آلودگی زیست محیطی با حضور واحدهای بادی و ادوات FACTS ارائه می‌شود. مسأله مذکور به‌صورت مسأله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذاران تولید و انتقال است. توجه شود که سرمایه‌گذاران تولید از فروش توان در آمد کسب می‌کنند و هزینه آنها برابر هزینه بهره‌برداری و احداث است. علاوه بر این، سرمایه‌گذاران بخش انتقال نیز با ارائه خدمات درآمد کسب می‌کنند و هزینه آنها برابر با هزینه احداث خط و ادوات FACTS می‌باشد. قیود مسأله مذکور شامل معادلات پخش توان AC، واحدهای بادی، ادوات FACTS، محدودیت بهره‌برداری سیستم و قید آلودگی محیط زیست است. همچنین مسأله یاد شده به‌صورت مدل احتمالی بیان می‌شود که این مدل ناشی از عدم قطعیت واحدهای بادی است. باید توجه داشت که مسأله کلی به‌صورت مسأله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح[۶] (MINLP) است. در بخش بعد مقاله، با استفاده از روش‌های خطی‌سازی مرسوم، مسأله ذکر شده به مسأله خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) مبدل می‌شود. از این رو نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- بیان مدل احتمالی مسأله با در نظر گرفتن مدل تصادفی واحدهای بادی
- در نظر گرفتن معادلات پخش توان AC
- در نظر گرفتن آلودگی محیط زیست
- در نظر گرفتن احداث ادوات FACTS
- ارائه مدل MILP برای مدل مسأله پیشنهادی

در ادامه، مدل واقعی و مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح آن در بخش دوم بیان خواهد شد. نتایج عددی انجام شده برروی شبکه تست در بخش سوم ذکر خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش چهارم ارائه می‌گردد.

۲- مدل مسأله پیشنهادی

۲-۱- مدل پایه مسأله

برای در این بخش مدل مسأله پیشنهادی ارائه می‌گردد که این مسأله به‌صورت مسأله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با بیشینه‌سازی سود مورد انتظار سرمایه‌گذاران مختلف در بخش تولید و انتقال می‌باشد. همچنین این مسأله مقید به معادلات پخش توان AC، محدودیت بهره‌برداری سیستم، ادوات FACTS، واحدهای بادی و آلودگی زیست محیطی است. از این‌رو مدل مسأله پیشنهادی به‌صورت زیر است:

$$\max \quad \left(R_G + R_T\right) - \left(C_G + C_T\right) \tag{۱}$$

به شرطی که:

$$R_G = \sum_{n\in\varphi_n}\sum_{t\in\varphi_t}\sum_{w\in\varphi_w} \pi_w \left\{ du_t \times LMP_{n,t,w} \times \sum_{i\in\varphi_i} AG_{i,n} PG_{i,t,w} \right\} \tag{۲}$$

$$R_T = \sum_{n\in\varphi_n}\sum_{j\in\varphi_n}\sum_{t\in\varphi_t}\sum_{w\in\varphi_w} \pi_w du_t \times FMP_{n,j,t,w} \times PL_{n,j,t,w} \tag{۳}$$

$$C_G = \sum_{i\in\varphi_i} y_i CG_i + \sum_{i\in\varphi_i}\sum_{t\in\varphi_t}\sum_{w\in\varphi_w} \pi_w du_t \lambda_{i,t} PG_{i,t,w} \tag{۴}$$

$$C_T = \sum_{n\in\varphi_n}\sum_{j\in\varphi_n} \frac{X_{n,j}}{2} CL_{n,j} + \sum_{f\in\varphi_f} FA_f CF_f \tag{۵}$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

$$\sum_{i\in\varphi_i} AG_{i,n}PG_{i,t,w} - \sum_{j\in\varphi_n} AL_{n,j}PL_{n,j,t,w} = PD_{n,t} - PW_{n,t,w} \qquad (۶)$$

$$: \mathrm{LMP}_{n,t,w} \qquad \forall \mathrm{n,t,w}$$

$$\sum_{i\in\varphi_i} AG_{i,n}QG_{i,t,w} + \sum_{f\in\varphi_f} AF_{f,n}^{p}QF_{f,t,w} - \sum_{j\in\varphi_n} AL_{n,j}QL_{n,j,t,w} = QD_{n,t} \qquad (۷)$$

$$\forall \mathrm{n,t,w}$$

$$PL_{n,j,t,w} = \left\{ \begin{array}{l} g_{n,j}\left(V_{n,t,w}\right)^2 - V_{n,t,w}V_{j,t,w} \\ \left\{ g_{n,j}\cos\left(\theta_{n,t,w}-\theta_{j,t,w}\right) + \left(b_{n,j}-bf_{n,j,t,w}\right)\sin\left(\theta_{n,t,w}-\theta_{j,t,w}\right)\right\} \end{array} \right\} X_{n,j} \qquad (۸)$$

$$: \mathrm{FMP}_{n,j,t,w} \qquad \forall \mathrm{n},j,t,w$$

$$QL_{n,j,t,w} = \left\{ \begin{array}{l} -b_{n,j}\left(V_{n,t,w}\right)^2 - V_{n,t,w}V_{j,t,w} \left\{ \begin{array}{l} g_{n,j}\sin\left(\theta_{n,t,w}-\theta_{j,t,w}\right) - \\ \left(b_{n,j}-bf_{n,j,t,w}\right)\cos\left(\theta_{n,t,w}-\theta_{j,t,w}\right) \end{array} \right\} \end{array} \right\} X_{n,j} \qquad (۹)$$

$$\forall \mathrm{n},j,t,w$$

$$\left(PG_{i,t,w}\right)^2 + \left(QG_{i,t,w}\right)^2 \le y_i\left(SG_i^{\max}\right)^2 \qquad \forall \mathrm{i,t,w} \qquad (۱۰)$$

$$\left(PL_{n,j,t,w}\right)^2 + \left(QL_{n,j,t,w}\right)^2 \le \left(SL_{n,j}^{\max}\right)^2 \qquad \forall n,j,\mathrm{t,w} \qquad (۱۱)$$

$$V_n^{\min} \le V_{n,t,w} \le V_n^{\max} \qquad \forall n,\mathrm{t,w} \qquad (۱۲)$$

$$\mathrm{X}_{nj} = \mathrm{X}_{jn} \qquad \forall n,j \qquad (۱۳)$$

$$\begin{aligned} -FA_f\sqrt{\left(SF_f^{\max}\right)^2 - \left((1-\eta_f)SF_f^{\max}\right)^2} \le QF_{f,t,w} \\ \le FA_f\sqrt{\left(SF_f^{\max}\right)^2 - \left((1-\eta_f)SF_f^{\max}\right)^2} \qquad \forall f,t,w \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

$$\mathrm{BF}_{n,j}^{\max}\mathrm{FA}_{n,j} \le bf_{n,j,t,w} \le \mathrm{BF}_{n,j}^{\max}\mathrm{FA}_{n,j} \qquad \forall n,j,t,w \qquad (۱۵)$$

$$\beta_i PG_{i,t,w} + \alpha_i \le \mathrm{E}_i^{\max} \qquad \forall i,t,w \qquad (۱۶)$$

رابطه (۱) تابع هدف مسأله پیشنهادی را عنوان می‌کند که شامل دو بخش است. بخش اول به درآمد سرمایه‌گذاران بخش‌های تولید و انتقال اشاره می‌کند که حاصل از فروش توان اکتیو می‌باشد. بخش دوم نیز هزینه‌های احداث و بهره‌برداری نیروگاه و احداث خطوط را بیان می‌کند. توجه شود که هر کدام از عبارت‌های تابع هدف در روابط (۲) الی (۵) بیان شده است. رابطه (۲) معرف درآمد سرمایه‌گذاران تولید می‌باشد که براساس قیمت حاشیه محلی[۷] (LMP) توان می‌فروشند که این قیمت برابر متغیر دوگان رابطه تعادل توان اکتیو در هر شین یا رابطه (۶) است. قید (۳) بیان‌گر درآمد سرمایه‌گذاران انتقال است که براساس قیمت‌های خدمات خطوط مرتبط (FMP) ارائه خدمت می‌کنند که FMP برابر با متغیر دوگان رابطه (۸) است. قید (۴) نیز هزینه‌های احداث و بهره‌برداری نیروگاه را به ترتیب معرفی می‌کند و هزینه‌های احداث خطوط انتقال و ادوات FACTS در قید (۵) بیان شده است. قیود پخش بار AC نیز در (۶) الی (۹) بیان شده است که به ترتیب بیان‌گر تعادل توان اکتیو در هر شین (۶)، تعادل توان راکتیو در هر شین (۷)، توان اکتیو (۸) و راکتیو (۹) عبوری از خط مابین شین‌های n و j می‌باشد. متغیر $X_{n,j}$ معرف احداث خطوط است که اگر برابر یک باشد، خط احداث شده و در غیراین‌صورت خط احداث نمی‌شود. محدودیت ظرفیت نیروگاه‌ها نیز در (۱۰) بیان شده است که در آن y_i برای نیروگاه‌های موجود برابر یک است و برای نیروگاه‌های پیشنهادی برای احداث می‌تواند صفر یا یک شود. قیود (۱۱) و (۱۲) محدودیت بهره‌برداری سیستم را ارائه می‌دهد که به ترتیب نشان‌گر محدودیت توان عبوری خطوط و ولتاژ شین‌ها هستند. قید (۱۳) به این موضوع اشاره می‌کند که خط بین j و n با خط بین n و j یکی است. قیود (۱۴) و (۱۵) نیز به ترتیب معرف محدودیت ظرفیت کنترل ادوات FACTS موازی و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025

سری هستند که به ترتیب برای توان راکتیو و سوسپتانس تعریف شده‌اند. باید توجه کرد که ادوات FACTS سری-موازی شامل دو قید هستند. در نهایت، محدودیت آلودگی زیست محیطی ناشی از واحدهای تولیدی در (۱۶) ذکر شده است.

در مسأله پیشنهادی، توان خروجی واحد بادی (PW) وابسته به سرعت باد است و سرعت باد نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. این وابستگی به‌صورت رابطه (۱۷) می‌باشد. باید توجه داشت که مدل مسأله پیشنهادی به علت عدم قطعیت سرعت باد به‌صورت احتمالاتی است که احتمال هر سناریو به‌صورت رابطه (۱۸) است:

$$PW = \begin{cases} 0 & 0 \le W \le W_{ci} \\ P_{rate}(W - W_{ci}) / (W_{rate} - W_{ci}) & W_{ci} \le W \le W_{rate} \\ P_{rate} & W_{rate} \le W \le W_{co} \\ 0 & W_{co} \le W \end{cases} \quad (۱۷)$$

$$\pi = \frac{a}{b}\left(\frac{W-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{W-a}{b}\right)^{c}\right] \quad (۱۸)$$

باید توجه کرد که تابع براساس توزیع ویبول است و عبارت‌های a، b و c ضرایب ثابت این توزیع احتمال می‌باشند.برگیرد.

۲-۲- بیان مدل MILP برای مسأله پیشنهادی

جدول مدل مسأله پیشنهادی ارائه شده در (۱) الی (۱۶) به‌صورت مدل غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح است. پس در این‌صورت زمان اجرای حل مسأله افزایش می‌یابد و امکان دارد که این مسأله در نقاط بهینه محلی گرفتار شود. در نهایت، این مقاله استفاده از مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح معادل با مسأله پیشنهادی را ارائه می‌دهد که در این صورت پیش‌بینی می‌شود، مسأله جدید به نقطه بهینه سراسری برسد و زمان اجرای حل مسأله بسیار کاهش یابد.

با توجه مدل مسأله پیشنهادی در بخش قبل، معادلات پخش بار AC به‌صورت غیرخطی هستند که برای خطی‌سازی آن فرض می‌شود که زاویه ولتاژ بین دو سر یک خط کمتر از ۶ درجه یا ۰/۱۰۵ رادیان است. همچنین دامنه ولتاژ شین‌ها نزدیک به یک پریونیت است. از این‌رو عبارت‌های $\cos(\theta_n-\theta_j)$ و $\sin(\theta_n-\theta_j)$ به‌ترتیب برابر یک و $(\theta_n-\theta_j)$ است. علاوه بر این، دامنه ولتاژ هر شین به‌صورت $V=1+\Delta V$ می‌تواند بیان شود که عبارت ΔV بسیار کمتر از یک است. همچنین عبارت‌های $(\Delta V)^2$ و $\Delta V(\theta_n-\theta_j)$ به علت مقادیر بسیار کم برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. پس قیود (۸)، (۹) و (۱۱) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$-SL_{n,j}^{\max}\left(1-X_{n,j}\right) \le PL_{n,j,t,w} - \left\{\begin{matrix} g_{n,j}\left(\Delta V_{n,t,w} - \Delta V_{j,t,w}\right) - \\ \left(b_{n,j} - bf_{n,j,t,w}\right)\left(\theta_{n,t,w} - \theta_{j,t,w}\right) \end{matrix}\right\} \le SL_{n,j}^{\max}\left(1-X_{n,j}\right) \quad \forall n,j,t,w \quad (۱۹)$$

$$-SL_{n,j}^{\max}\left(1-X_{n,j}\right) \le QL_{n,j,t,w} + \left\{\begin{matrix} g_{n,j}\left(\theta_{n,t,w} - \theta_{j,t,w}\right) + \\ \left(b_{n,j} - bf_{n,j,t,w}\right)\left(\Delta V_{n,t,w} - \Delta V_{j,t,w}\right) \end{matrix}\right\} \le SL_{n,j}^{\max}\left(1-X_{n,j}\right) \quad \forall n,j,t,w \quad (۲۰)$$

$$\left(PL_{n,j,t,w}\right)^2 + \left(QL_{n,j,t,w}\right)^2 \le \left(SL_{n,j}^{\max}\right)^2 X_{n,j} \quad \forall n,j,\mathrm{t,w} \quad (۲۱)$$

در روابط (۱۹) و (۲۰)، عبارت‌های $bf_{n,j,t,w}(\theta_{n,t,w}-\theta_{j,t,w})$ و $bf_{n,j,t,w}(\Delta V_{n,t,w}-\Delta V_{j,t,w})$ از ضرب دو متغیر پیوسته تشکیل شده‌اند که برای خطی‌سازی آن از روش زیر استفاده می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

$$ab = c \quad \forall a_{\min} \le a \le a_{\max}, b_{\min} \le b \le b_{\max}$$
$$\Leftrightarrow \begin{cases} a = a_{\min} + \sum_{i=1}^{k_s} 2^i \, \Delta a \times x_i \quad \forall k_s = \log_2^{N_s} \\ c = a_{\min} b + \sum_{i=1}^{k_s} 2^i \, \Delta a \times z_i \\ b_{\min}(1-x_i) \le z_i - b \le b_{\max}(1-x_i) \\ b_{\min} x_i \le z_i \le b_{\max} x_i \end{cases} \quad (۲۲)$$

در این رابطه، N_s برابر تعداد قسمت‌بندی محدوده a و x معرف متغیر باینری هستند. باید توجه داشت که رابطه (۲۱) به‌صورت نامعادله دایره‌ای است که برای خطی‌سازی نامعادله دایره‌ای به‌صورت تبدیل آن به صفحه در قالب چند ضلعی منتظم عمل می‌شود.

صفحه دایره‌ای می‌تواند از اشتراک صفحات چندین صفحه مربعی به‌دست آید. باید توجه کرد که اضلاع صفحه مربعی متناسب با معادله خط است که در این‌صورت معادله خطی رابطه (۲۱) به‌صورت زیر است:

$$\cos(m\Delta\alpha)PL_{n,j,t,w} + \sin(m\Delta\alpha)QL_{n,j,t,w} \le X_{n,j} SL_{n,j}^{\max} \quad \forall n, j, t, w, m \quad (۲۳)$$

در رابطه بالا $\Delta\alpha$ برابر انحراف زاویه است. به‌عنوان مثال اگر نامعادله دایره‌ای از اشتراک ۱۸۰ صفحه به‌دست بیاید، در این‌صورت $\Delta\alpha$ برابر ۲ درجه است و m از ۱ تا ۱۸۰ شمارش می‌شود. شایان ذکر است که قید (۱۰) نیز به‌صورت (۲۳) خطی‌سازی می‌شود.

براساس روابط (۱) الی (۱۶)، عبارت‌های R_G و R_T به‌صورت غیرخطی هستند. علت غیرخطی بودن آنها ناشی از ضرب دو متغیر است. برای خطی‌سازی این دو عبارت از روابط معادل استفاده می‌شود. توجه شود که این روند تنها زمانی صادق است که معادلات معادل در تابع هدف قرار گیرند. معادلات معادل این دو رابطه به شرح زیر است که دارای روندی خطی است.

$$R'_G = \sum_{n\in\varphi_n} \sum_{t\in\varphi_t} \sum_{w\in\varphi_w} \pi_w \left\{ du_t \times \left(LMP_{n,t,w} + \sum_{i\in\varphi_i} AG_{i,n} PG_{i,t,w} \right) \right\} \quad (۲۴)$$

$$R'_T = \sum_{n\in\varphi_n} \sum_{j\in\varphi_n} \sum_{t\in\varphi_t} \sum_{w\in\varphi_w} \pi_w \, du_t \times \left(FMP_{n,j,t,w} + PL_{n,j,t,w} \right) \quad (۲۵)$$

باید توجه شود که این روابط معادل عبارت‌های R_G و R_T نیستند، ولی نقطه بهینه بدست آمده با این معادلات برابر نقطه بهینه مسأله اصلی است. علاوه بر این، عبارت‌های R_G و R_T در خروجی مسأله محاسبه می‌شوند.

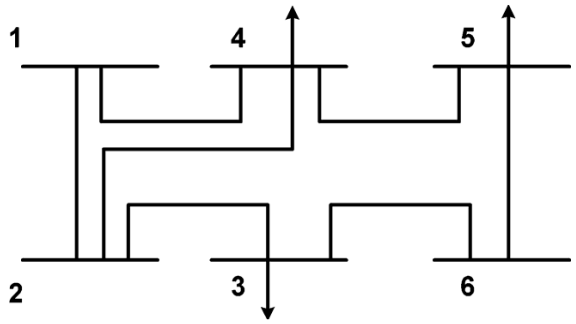
۳- نتایج عددی

هر در این بخش، نتایج عددی حاصل از مدل مسأله پیشنهادی برروی شبکه ۶ شینه IEEE ارزیابی می‌گردد. این نتایج توسط نرم افزار بهینه‌سازی GAMS 23.5.2 و روش حل‌های BONMIN و CPLEX به ترتیب برای مسأله‌های MINLP و MILP قابل استخراج می‌باشد.

ساختار شبکه ۶ شینه در شکل (۱) ارائه شده است [۱۵] که در این شبکه تنها خطوط موجود مشخص هستند و همچنین مشخصات خطوط موجود و پیشنهادی نیز در [۱۵] بیان شده است. توجه شود که مقاومت خطوط نیز ۰٫۱ میزان راکتانس خطوط فرض شده است. مشخصات نیروگاه‌های موجود و پیشنهادی نیز در [۱۵] ارائه گردیده است و در مورد ضرایب آلودگی، β برابر ۰٫۱ قیمت بهره‌برداری فرض شده و α نیز ۴ برابر قیمت بهره‌برداری فرض شده است. شایان ذکر است که برنامه‌ریزی برای پنج سال مختلف در نظر گرفته شده است و همچنین فرض شده است که نتایج هر سال یکسان است. از این رو نتایج برای یک سال انجام شده است که تعداد ساعات دوره‌های زمانی مختلف و ضریب بار آن در [۱۵] ذکر شده است. علاوه بر این، در این مقاله فرض شده است که بارهای مصرفی شبکه در شین‌های ۳، ۴ و ۵ قرار دارند که ضریب بار آنها به ترتیب برابر ۰٫۴، ۰٫۳ و ۰٫۳ است. علاوه بر این، در این مقاله مزرعه بادی استفاده شده است که سرعت باد یک مزرعه بادی با توان نامی ۷۰

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025

مگاوات، سرعت آستانه ۴ متر بر ثانیه، سرعت نامی ۱۴ متر بر ثانیه و سرعت قطع ۲۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که این واحد بادی در شین ۲ قرار گرفته است. همچنین ضرایب a، b و c تابع چگالی احتمال ویبول برای واحد بادی به ترتیب برابر ۲،۸، ۵،۱۴۱ و ۴،۰۱۲ می‌باشند. میزان آلودگی مجاز برابر ۲۴۰۰۰ تن در نظر گرفته شده است و مشخصات ادوات FACTS نیز در جدول (۱) بیان شده است.



شکل (۱): ساختار شبکه ۶ شینه [۱۵]

Figure (1): 6-bus network structure

Table (1): FACTS device specifications

جدول (۱): مشخصات ادوات FACTS

ادوات موازی						
واحد	**شین**	**ظرفیت** (MVA)	**نوع**	**هزینه احداث** ($/kWy)	FOR (%)	**راندمان** (٪)
C1	۳	۲۰	STATCOM	۱۰	۱،۲	۸۷
C2	۴	۱۲	SVC	۴	۱،۲	۹۰
C3	۵	۱۲	SVC	۴	۱،۲	۹۰
ادوات سری						
واحد	**از- به**	**محدوده سوسپتانس (پریونیت)**	**نوع**	**هزینه احداث ($/kWy)**	FOR (%)	**راندمان** (٪)
C4	۲-۴	بین صفر و ۰،۱	TCSC	۳	۱،۲	۹۰
ادوات سری-موازی						
واحد	شین، از-به	محدوده سوسپتانس (پریونیت)	نوع	**هزینه احداث** ($/kWy)	FOR (%)	**راندمان** (٪)
C5	۶، ۵-۶	بین ۰،۱- و ۰،۱، ظرفیت بخش موازی برابر ۱۰ MVAR	UPFC	۱۰	۱،۲	۸۵

نتایج این بخش در جدول‌های (۲) الی (۴) نشان داده شده است که به ترتیب بیان‌گر نتایج اقتصادی، سود مورد انتظار و نتایج فنی مسأله پیشنهادی هستند. براساس جدول (۲) در سطح بار پایین (۲۵ مگاوات و ۱۷ مگاولت آمپر راکتیوی)، هیچ خط و یا نیروگاهی احداث نمی‌شود، زیرا که ساختار موجود برای شبکه ۶ شینه و حضور واحد بادی در آن قادر است این میزان

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

بار را تأمین کند. در این حالت میزان کل درآمد نسبت به کل هزینه (در این حالت فقط هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها وجود دارد) بیشتر است، لذا مسأله مذکور سودآور است.

با توجه به جدول (۲)، افزایش سطح بار موجب افزایش ادوات احداثی است. به طوری که در سطح با ۵۰ مگاواتی و ۳۴ مگاولت آمپری، ۲ نیروگاه و ۲ ادوات FACTS موازی و ۱ ادوات FACTS سری احداث می‌شود. همچنین در سطح بار ۷۵ مگاواتی و ۵۱ مگاولت آمپری، ۵ نیروگاه و ۳ ادوات FACTS موازی و ۱ ادوات FACTS سری و و ۱ ادوات FACTS سری-موازی احداث می‌شود. همچنین باید توجه کرد در سطح بار ۱۱۵ مگاواتی و ۸۰ مگاولت آمپری، ظرفیت تولید کلیه نیروگاه‌ها کمتر از این سطح بار هستند، لذا مسأله پیشنهادی دارای جواب شدنی نیست. توجه شود که حضور ادوات FACTS موجب کاهش موارد احداثی خط و نیروگاه می‌شود. زیرا که براساس جدول (۲)، در هیچ مورد خطی احداث نمی‌شود و تعداد نیروگاه نسبت به میزان بار کمتر است. به دنبال این امر هزینه احداثی و بهره‌برداری کاهش می‌یابند. علاوه بر مورد فوق، انتخاب خطوط، نیروگاه‌ها و ادوات FACTS در هر سطح بار برای دو مدل MINLP و MILP یکسان است. از این رو هزینه احداث خطوط و نیروگاه‌ها نیز برای دو مدل مسأله پیشنهادی یکسان خواهد بود. تفاوت دو مدل در هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها، درآمد نیروگاه‌ها و درآمد خطوط است. زمان محاسباتی مدل MILP نسبت به مدل MINLP با توجه به جدول (۲) بسیار پایین‌تر است و همچنین این مدل همواره دارای جواب بهینه مطلق است، در صورتی که مدل MINLP دارای جواب بهینه محلی است و همچنین در سطح بار بزرگتر قادر نیست که به جواب شدنی دست پیدا کند. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود میزان سوددهی در سطوح بار بالا منفی است. اما باید توجه شود که درآمد خطوط، درآمد نیروگاه‌ها و هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها برای یکسان ارائه شده است. جدول (۳) میزان سود حاصله برای هر سطح بار را نشان می‌دهد. براساس این جدول مشاهده می‌شود که طرح ارائه شده دارای سود آوری برای سرمایه‌گذاری همزمان احداث خط، نیروگاه و ادوات FACTS است. نتایج فنی مسأله G&TEP پیشنهادی در جدول (۴) بیان شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، متوسط دامنه ولتاژ شبکه در کلیه سطوح بارهای انتخاب شده در مابین حدود مجاز (۰,۹۵-۱,۰۵ پریونیت) قرار دارند که این امر به دلیل وجود نیروگاه‌های و ادوات FACTS مختلفی در کلیه شین‌های شبکه است که می‌توانند تا حد امکان سطوح بار را به‌صورت محلی تأمین کنند. لذا در این صورت میزان افت ولتاژ بسیار کم می‌شود. همچنین توجه شود که میزان اختلاف دامنه ولتاژ برای دو مدل MINLP و MILP با شرایط یکسان بسیار ناچیز بوده که دارای حداکثر مقدار ۰,۵ درصدی است. علاوه بر این موارد، تلفات اکتیو و راکتیو شبکه در مدل MILP برابر صفر است که این امر به علت تقریب روابط توان اکتیو و راکتیو عبوری خطوط است. اما باید توجه شود که این مدل در انتخاب ادوات احداثی همانند مدل MINLP عمل می‌کند و همچنین دارای زمان محاسبات پایین و وضعیت جواب مطلوب است. از این رو تقریب مذکور با توجه به ویژگی‌های بسیار مدل MILP قابل قبول است. به عنوان نکته آخر، در جداول (۲) الی (۴) عبارت "-" برای حالت‌های Time out و Infeasible استفاده شده است. زیرا در این حالت‌ها مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای مختلف قابل قبول نیست.

Table (2): Economic results of the proposed problem

جدول (۲): نتایج اقتصادی مسأله پیشنهادی

کل بار اکتیو شبکه (MW)		۲۵	۵۰	۷۵	۱۱۵
کل بار راکتیو شبکه (MVAR)		۱۷	۳۴	۵۱	۸۰
موارد احداثی	مدل MINLP	-	B2, B8, C2, C3, C4	-	-
	مدل MILP	-	B2, B8, C2, C3, C4	A5,B1, B2,B4, B8, C1, C2, C3, C4, C5	-
درآمد	نیروگاه‌ها	۴,۸	۸,۶	-	-

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

درآمد ($10^6$$)- مدل MINLP	خطوط	۳,۱	۷,۴	-	-
	کل	۷,۹	۱۶	-	-
درآمد ($10^6$$)- مدل MILP	نیروگاه‌ها	۴,۴	۸,۱	۱۲	-
	خطوط	۲,۸	۶,۹	۹,۹	-
	کل	۷,۲	۱۵	۲۱,۹	-
هزینه ($10^6$$)- مدل MINLP	احداث خطوط	۰	۱,۸	-	-
	احداث نیروگاه‌ها	۰	۶,۵	-	-
	بهره‌برداری نیروگاه‌ها	۴	۷,۱	-	-
	کل	۴	۱۵,۴	-	-
هزینه ($10^6$$)- مدل MILP	احداث خطوط	۰	۱,۸	۳,۱	-
	احداث نیروگاه‌ها	۰	۶,۵	۲۶	-
	بهره‌برداری نیروگاه‌ها	۳,۶	۶,۶	۱۰,۱	-
	کل	۳,۶	۱۳,۹	۳۹,۲	-
زمان اجراء (s)	مدل MINLP	۱۳۴۲	۵۰۱۲	-	-
	مدل MILP	۸۴	۱۵۲	۳۰۱	-
وضعیت جواب	مدل MINLP	Local optimal	Local optimal	Time out	Infeasible
	مدل MILP	Optimal	Optimal	Optimal	Infeasible

Table (3): Profit for the assumption of unreliability

جدول (۳): سود برای حالت فرض عدم قابلیت اطمینان

کل بار اکتیو شبکه (MW)		۲۵	۵۰	۷۵	۱۱۵
کل بار راکتیو شبکه (MVAR)		۱۷	۳۴	۵۱	۸۰
سود ($10^6$$)	مدل MINLP	۱۹,۵	۳۷,۷	-	-
	مدل MILP	۱۸	۳۶,۲	۲۸,۷	-

جدول (۵) تأثیر تغییر مکان واحد بادی برروی سود مورد انتظار مسأله پیشنهادی را بیان می‌کند. براساس این جدول، حضور واحد بادی در شین ۴ موجب می‌شود که سود مورد انتظار مسأله پیشنهادی نسبت به مابقی شین‌ها بیشتر باشد.

Table (4): Technical results of the proposed problem

جدول (۴): نتایج فنی مسأله پیشنهادی

کل بار اکتیو شبکه (MW)		۲۵	۵۰	۷۵
کل بار راکتیو شبکه (MVAR)		۱۷	۳۴	۵۱
بیشترین متوسط دامنه ولتاژ (pu)- شین-بازه زمانی آخر	مدل MINLP	۱-۱	۱-۱	-
	مدل MILP	۱-۱	۱-۱	۱-۱
کمترین متوسط دامنه	مدل MINLP	۰,۹۸۱-	۰,۹۶۹-	-

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

ولتاژ (pu)-شین-بازه زمانی آخر		۵	۵	
	مدل MILP	۰,۹۸۳-۵	۰,۹۷۱-۵	۰,۹۶۲-۵
تلفات انرژی (MWh)	مدل MINLP	۱,۷	۳,۱	-
	مدل MILP	۰	۰	۰
کل تلفات راکتیو در کل دورهٔ شبیه‌سازی (MVARh)	مدل MINLP	۲,۱	۳,۵	-
	مدل MILP	۰	۰	۰

Table (5): Investigating the effects of wind unit location changes on profits

جدول (۵): بررسی اثرات تغییرات مکان واحد بادی بر سود

کل بار اکتیو شبکه (MW)		۵۰					
کل بار راکتیو شبکه (MVAR)		۳۴					
مکان واحد بادی (شین)		۱	۲	۳	۴	۵	۶
سود مورد انتظار (10^6\$)	مدل MINLP	۳۲,۳	۳۷,۷	۳۶	۳۹,۴	۳۸,۵	۳۵,۲
	مدل MILP	۳۱,۲	۳۶,۲	۳۴,۷	۳۷,۷	۳۷	۳۳,۹

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی احتمالاتی توسعه همزمان تولید انتقال با حضور واحدهای بادی و ادوات FACTS و با فرض قیود آلودگی زیست محیطی ارائه گردید. مسأله مذکور به‌صورت مسأله بهینه‌سازی است که در آن تابع هدف برابر بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذاران تولید و انتقال در بازار برق است. این مسأله مقید به قیود پخش توان AC، قیود احداث ادوات، واحد بادی، آلودگی زیست محیطی و محدودیت بهره‌برداری سیستم است. مسأله پیشنهادی به‌صورت ذاتی دارای مدل غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح است که این امر موجب بروز مشکلاتی در حل مسأله خواهد شد. لذا برای دستیابی به ویژگی‌های منحصر به فرد مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح، مسأله پیشنهادی به این مدل تبدیل خواهد شد. در نهایت با توجه به نتایج عددی مشاهد شد که نتایج احداث برای دو مدل پیشنهادی یکسان است. مدل MILP همواره دارای پاسخ بهینه مطلق و زمان پاسخ‌گویی پایین است. علاوه بر این، حضور ادوات FACTS در شبکه موجب کاهش هزینه احداث خطوط و در نهایت موجب افزایش سود مورد انتظار خواهد شد. قید آلودگی محیط زیست و کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری در یک راستا حرکت می‌کنند.

References

مراجع

[1] D. Alvarado, R. Moreno, and A. S. Street, "Co-Optimizing Substation Hardening and Transmission Expansion Against Earthquakes: A Decision-Dependent Probability Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 3, pp. 2058–2070, May. 2023 (doi:10.1109/TPWRS.2022.3180363).

[2] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "Transportable Energy Storage System Planning for Mitigating Grid Vulnerability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 5, pp. 4462–4475, September. 2023 (doi:10.1109/TPWRS.2022.3214443).

[3] R. Diewvilai and K. Audomvongseree, "Regionalized Generation Expansion Planning: Integrating Spatial Constraints," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 163856 - 163882, October. 2024 (doi: 10.1109/ACCESS.2024.3488006).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025

[4] C. Pan, B. Hu, and Y. Wang, "Reliability-Constrained Economic Dispatch With Analytical Formulation of Operational Risk Evaluation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 39, no. 2, pp. 4422–4436, September. 2023 (doi: 10.1109/TPWRS.2023.3317973).

[5] A. Cerezo, R. Berterand, and L. Baringo, "Computational Performance Enhancement Strategies for Risk-Averse Two-Stage Stochastic Generation and Transmission Network Expansion Planning ," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 39, no. 1, pp. 273–286, January. 2024 (doi: 10.1109/TPWRS.2023.3236397).

[6] J. Rahman, and J. Zhong, "Steady-State Modeling of Small Modular Reactors for Multi-Timescale Power System Operations With Temporally Coupled Sub-Models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 40, no. 1, pp. 793–805, January 2025 (doi: 10.1109/TPWRS.2024.3398414).

[7] B. Chen, C. He, L. Nan and L. Wu, "Distributionally Robust Coordinated Expansion Planning for Generation, Transmission, and Demand Side Resources Considering the Benefits of Concentrating Solar Power Plants," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 2, pp. 1205–1218, March 2023 (doi: 10.1109/TPWRS.2022.3171515).

[8] T. Xu, C. Shao, M. shahidehpour and X. Wang, "Coordinated Planning Strategies of Power Systems and Energy Transportation Networks for Resilience Enhancement," *IEEE Trans. on Sustainable Energy.*, vol. 14, no. 2, pp. 1217–1229, April 2023 (doi: 10.1109/TSTE.2022.3199508).

[9] J. Tabora, G. Velasquez, D. Rivera and O. Dominguez, "A Multiobjective Strategy for Generation Expansion Planning to Enable Increased Penetration of Variable Renewable Energy Sources," *IEEE Access*., vol. 12, pp. 187665 - 187675, December 2024 (doi: 10.1109/ACCESS.2024.3514373).

[10] Y. Kabiri, M. F. Firuzabad, and M. shahidehpour, "Robust Coordinated Distribution System Planning Considering Transactive DSO's Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 2, pp. 187665 - 187675, March 2023 (doi: 10.1109/TPWRS.2022.3191695).

[11] N. Wandile, K. Moloi, and M. Kabeya, "Comprehensive Analysis of Approaches for Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Access*., vol. 12, pp. 195778 - 195815, December 2024 (doi: 10.1109/ACCESS.2024.3519180).

[12] A. Bertoletti, and J. Perado, "Unbalanced Distribution System Expansion and Energy Storage Planning Under Wildfire Risk," *IEEE Access*., vol. 11, pp. 125256 - 125266, November 2023 (doi: 10.1109/ACCESS.2023.3331016).

[13] R. Bayani, and S. D. Manshadi, "Resilient Expansion Planning of Electricity Grid Under Prolonged Wildfire Risk," *IEEE Trans. on Smart Grid.*, vol. 14, no. 5, pp. 3719 - 3731, September 2023 (doi: 10.1109/TSG.2023.3241103).

[14] Y. Li, Q. Chen, K. Hur, and C. Kang, "Active Distribution Network Expansion Planning With Dynamic Thermal Rating of Underground Cables and Transformers," *IEEE Trans. on Smart Grid*., vol. 15, no. 1, pp. 218 - 232, January 2024 (doi: 10.1109/TSG.2023.3266782).

[15] H. Hamidpour, and et al., "Flexible, reliable, and renewable power system resource expansion planning considering energy storage systems and demand response programs", IET Renewable Power Generation, vo. 13, no. 11, pp. `862-1872, 2019. (doi: 10.1109/TIA.2024.3476241).

[16] A. Behdan, B. Fani, E. Adib, "Reliability evaluation of power system SVC types using a markov chain", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 6, no. 2, pp. 13-22, Summer 2016 (in Persian).

[17] H. Bisheh, M. Moazzami, B. Fani, G. Shahgholian, "A new method for controlling microgrids protection settings with the high penetration of distributed generation", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 71-90, Winter 2021 (in Persian).

زیرنویس‌ها:

[1] Generation and Transmission Expansion Planning

[2] Generation and Expansion Planning

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

[3]Transmission Expansion Planning
[4] Mixed Integer Linear Problem
[5] Linear planning
[6] Mixed Integer Non-linear Problem
[7] Local Marginal Price

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.527]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 4- Winter 2025