فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیستم / شماره ۸۳/ زمستان ۱۴۰۳ / صفحات ۱۵۷-۱۳۳

کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر به منظور افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده از جبرانسازی توان راکتیو و تجدیدآرایش شبکه

بهداد آرندیان [۱]
استادیار دانشکده مهندسی برق، واحد دولت آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران،
arandian@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

چکیده

به علت وجود نگرانی‌های ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت فسیلی، دولت‌ها و سازمان‌ها به سمت وسوی استفاده از فناوری‌های جدید با قابلیت آلودگی محیط زیست پایین به عنوان منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مانند منابع بادی هستند. از اینرو پیش‌بینی می‌شود که ظرفیت منابع یاد شده در شبکه توزیع در چند سال آینده بسیار افزایش یابد. لذا برای جلوگیری از حوادث قابل انتظار از عدم مدیریت این عناصر در شبکه توزیع، نیاز به مدیریت انرژی عناصر یاد شده و همچنین ایجاد تغییر وضعیت ساختار شبکه تحت عنوان تجدیدآرایش جهت افزایش ظرفیت شبکه توزیع جهت استفاده از این منابع است. علاوه بر این موضوع، افزایش تعداد عناصر یاد شده در شبکه توزیع موجب افزایش پارامترهای عدم قطعیت شبکه توزیع می‌شود. لذا بهره‌بردار شبکه توزیع بایستی بتواند به ازای تمامی سناریوهای حاصل از پارامترهای مختلف عدم قطعیت شرایط مدیریتی خاصی را انجام دهد تا در این صورت شبکه توزیع با عملکرد مناسبی قادر به فعالیت باشد. نتایج روش پیشنهادی نشان می‌دهد استفاده از منابع تولید پراکنده باعث کاهش ۷۷ درصدی هزینه‌ها و استفاده از جبرانسازی و تجدیدآرایش باعث کاهش ۱۸ درصدی هزینه‌ها می‌گردد.

طبقه‌بندی JEL: E۲۱, R۰۲, S۱۲, C۲۳.

کلیدواژه‌ها: تجدید آرایش، جبرانساز توان راکتیو، شبکه توزیع، ظرفیت میزبانی.

---

۱. نویسنده مسئول

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

۱- مقدمه

توسعه پایدار بدون حفظ و نگهداری صحیح محیط‌زیست میسر نخواهد بود و به همین دلیل، بکارگیری فناوری‌های سبز یکی از الزامات آتی صنعت خواهد بود. چرخش چرخ صنعت بدون انرژی میسر نخواهد بود و آنچه بیش از پیش به نگرانی‌های جهانی در زمینه انرژی دامن زده است، محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی است. با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند باد و خورشید افزایش یافته است. در کشورهای انرژی محور همچون ایران که رشد اقتصادی تابع مستقیمی از انرژی است، عواملی مانند تقاضای انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر می‌توانند بر ارتقای شاخص توسعه انسانی تأثیربسزایی داشته باشند [۱]. به علت وجود نگرانی‌های ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت فسیلی، دولت‌ها و سازمان‌ها به سمت وسوی استفاده از فناوری‌های جدید با قابلیت آلودگی محیط زیست پایین به عنوان منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مانند منابع بادی هستند. مطالعات نشان می‌دهد کیفیت محیط زیست به استفاده هر چه بیشتر از این منابع بستگی دارد [۲]. از اینرو پیش‌بینی می‌شود که ظرفیت منابع یاد شده در شبکه توزیع در چند سال آینده بسیار افزایش یابد. لذا برای جلوگیری از حوادث قابل انتظار از عدم مدیریت این عناصر در شبکه توزیع، نیاز به مدیریت انرژی عناصر یاد شده و همچنین ایجاد تغییر وضعیت ساختار شبکه تحت عنوان تجدیدآرایش جهت افزایش ظرفیت شبکه توزیع جهت استفاده از این منابع است.به منظور استفاده حداکثری از این منابع باید ظرفیت شبکه توزیع افزایش یابد که نیازمند ارائه رهکارهای گوناگونی است.

علاوه بر این موضوع، افزایش تعداد عناصر یاد شده در شبکه توزیع موجب افزایش پارامترهای عدم قطعیت شبکه توزیع خواهد شد. منظور از عدم قطعیت به این شرح است که یک و یا چند پارامتر از عناصر موجود در شبکه توزیع مانند تقاضا مصرفی، سرعت وزش باد و مواردی دیگر همواره دارای وضعیت مشخصی نیستند. لذا بهره‌بردار شبکه توزیع بایستی بتواند به ازای تمامی سناریوهای حاصل از پارامترهای مختلف عدم قطعیت شرایط مدیریتی خاصی را انجام دهد تا در این صورت شبکه توزیع با عملکرد مناسبی قادر به فعالیت باشد.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

در [۳] از روش کلاسیک ریاضی برای حل مسئله استفاده شده است. در این مقاله افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد و میزان تقاضا الکتریکی مدلسازی گردیده است. شایان ذکر است که مدل مسئله پیشنهادی به-صورت مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با کمینه‌سازی شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود مسئله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر منابع تولید پراکنده[۱] و محدودیت‌های فنی در شبکه توزیع است. در [۴-۶] حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. در [۴] بررسی عملکرد سیستم-های فتوولتائیک[۲] در شبکه توزیع بحث شده است. براساس آن سیستم‌های فتوولتائیک در ساعات حوالی ظهر توان بالایی را به شبکه تزریق می‌کنند که این امر موجب افزایش شدید ولتاژ خواهد شد. همچنین در [۵] عملکرد واحدهای بادی بررسی شده است که براساس آن، توان خروجی واحدهای بادی وابسته به سرعت باد است. از آنجا که سرعت باد دارای وضعیت مشخصی نیست، لذا توان خروجی واحدهای بادی نیز دارای عدم قطعیت است. در [۶] نیز افزایش ظرفیت شبکه با استفاده از منابع بادی مدل شده است. براساس [۴]، مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع موجب عملکرد بهینه شبکه خواهد شد و همچنین شاخص‌های آن بهبود خواهند یافت. همچنین در [۷]، مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده در کنار ذخیره‌سازهای انرژی[۳] به منظور افزایش انعطاف‌پذیری شبکه توزیع[۴] ارائه شده است.

در [۸-۱۱]، مسائل مختلفی از تجدیدآرایش شبکه توزیع[۵] در حضور خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده وذخیره‌سازهای انرژی بیان شده است. در [۸و۹] تجدیدآرایش شبکه توزیع در حضور خودروهای الکتریکی بیان شده است و در [۱۰و۱۱] تجدیدآرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده مانند سیستم‌های

۱. Distributed generation
۲. Photovoltaic
۳. Energy storage
۴. Distribution network resilience
۵. Distribution network reconfiguration

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

فتوولتائیک و توربین‌های بادی[۱] بیان شده است. در این مراجع عنوان شده است که مدل مسئله به‌صورت برنامه نویسی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح[۲] (MINLP) است که عموماً برای حل آن از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم آموزش و یادگیری، ازدحام ذرات، ژنتیک و میگوها استفاده شده است. در [۱۲و۱۳] مدل مسئله تجدیدآرایش ریزشبکه در حضور خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده ارائه شده است. مسئله مذکور به‌صورت مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با کمینه-سازی هزینه‌های تامین انرژی است. همچنین قیود مسئله شامل معادلات شبکه، خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده و قابلیت اطمینان است. این مسئله به‌صورت MINLP است که مرجع مذکور برای حل آن از الگوریتم خودتطبیقی انتخاب تکثیری بهبودیافته[۳] استفاده شده است. براساس نتایج این مرجع، ارائه مسئله مذکور در شبکه توزیع موجب بهبود عملکرد خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده در ریز شبکه شده است. همچنین تلفات و هزینه انرژی نیز متناسباً نسبت به عدم استفاده از مسئله مذکورکاهش می‌یابند. در مرجع [۱۴و۱۵] افزایش ظرفیت میزبانی شبکه در حضور خودروهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. در این مراجع از الگوریتم‌های هوشمند جهت حل مسئله استفاده شده است. مرجع [۱۶] افزایش ظرفیت میزبانی با استفاده از جبرانساز SVC صورت پذیرفته است. در این مرجع از ترانسفورماتورهای تپ چنجردار و جبرانساز SVC برای افزایش استفاده از منابع تولید پراکنده استفاده شده است. در مراجع [۱۷-۲۱] افزایش ظرفیت شبکه توزیع برای استفاده از سلول‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. این مراجع عدم قطعیت استفاده از این منابع را نیز مدل نموده اند. در جدول ۱ خلاصه مراجع مرتبط با موضوع پژوهش ارائه شده است تا میزان نوآوری ملموس تر باشد.

۱. Wind turbines
۲. Mixed Integer Non Linear Programming
۳. Self-Adaptive Modified Clonal Selection Algorithm

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

جدول ۱. خلاصه مقالات مرتبط با موضوع پژوهش

مرجع	انرژی تجدید پذیر	جبرانسازی توان راکتیو	تجدیدآرایش	عدم قطعیت	تابع هدف
۳	*	-	*	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۵	*	-	-	*	کاهش هزینه شبکه
۸	-	-	*	*	کاهش هزینه شبکه
۱۰	*	-	-	*	کاهش هزینه شبکه
۱۲	*	-	*	-	کاهش هزینه تامین انرژی
۱۴	*	-	-	-	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۱۶	-	*	-	-	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۱۸	*	-	-	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۲۱	*	-	-	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
این پژوهش	*	*	*	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه

جدول فوق نشان می‌دهد افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تجدیدپذیر مانند منابع بادی به طور همزمان با استفاده از تجدیدآرایش و جبرانسازی توان راکتیو مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش مسئله «کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر به منظور افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده از جبرانسازی توان راکتیو و تجدیدآرایش شبکه» بیان می‌گردد. لذا نوآوری مقاله مدلسازی همزمان منابع تجدیدپذیر و جبرانسازهای توان راکتیو می‌باشد که با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تجدیدآرایش مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مدل سیستم مورد بررسی تشریح می‌گردد. سپس در بخش ۳ نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی روش پیشنهادی با توضیحات و اشکال مربوطه ارائه می‌گردد. و در نهایت بخش ۴ دستاوردهای این مقاله بصورت خلاصه ارائه و جمع‌بندی می‌شود.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

۲- مدلسازی

در این بخش به مدلسازی مسئله پرداخته می‌شود. در ادامه لیست علائم و اختصارات استفاده شده در این بخش ذکر میگردد.

جدول ۲. لیست علائم و اختصارات

شمارنده‌ها و مجموعه‌ها

i	شمارنده تولید پراکنده
n, h	شمارنده باس
t	شمارنده گام زمانی
k	شمارنده قسمت خطی‌سازی صفحه دایره‌ای
e, g	شمارنده سناریو و اجرای سناریو
w	شمارنده سناریو
s	شمارنده منابع توان راکتیو
φ_{dg}	مجموعه تولید پراکنده
φ_t	مجموعه گام زمانی
φ_n	مجموعه باس
φ_s	مجموعه منابع توان راکتیو

متغیرها

P^{Sub}	توان اکتیو پست و یا شبکه بالادست
Q^{Sub}	توان راکتیو پست و یا شبکه بالادست
P^L	توان اکتیو عبوری خط
Q^L	توان راکتیو عبوری خط
P^{DG}	توان اکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده DG
Q^r	توان راکتیو تولیدی منابع جبرانساز
V	دامنه ولتاژ
ΔV	انحراف ولتاژ
θ	زاویه ولتاژ
La	تقاضا اکتیو تغذیه نشده
N^{RCS}	تعداد کلیدزنی
NL	تعداد حلقه‌های اصلی
u	متغیر باینری حضور تولید پراکنده
V	متغیر باینری راه‌اندازی تولید پراکنده
W	متغیر باینری خاموشی تولید پراکنده
Sw	متغیر باینری تعیین وضعیت عملکرد کلید سوار شده برروی خط

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

ثابت‌ها

λ	قیمت بهره‌برداری تولید پراکنده
SU	هزینه راه‌اندازی تولید پراکنده
SD	هزینه خاموشی تولید پراکنده
ρ	قیمت انرژی
γ	نسبت قیمت جریمه انرژی تغذیه نشده به قیمت انرژی
A^{Sub}	ماتریس تلاقی شبکه بالادست و باس
A^{DG}	ماتریس تلاقی باس و تولید پراکنده
A^{L}	ماتریس تلاقی باس و خط
g	رسانایی خط
b	سوسپتانس خط
V^{max}	حداکثر دامنه ولتاژ
V^{min}	حداقل دامنه ولتاژ
$S^{L,max}$	حداکثر توان عبوری خط
$S^{Sub,max}$	حداکثر توان ارسالی شبکه بالادست
$S^{DG,max}$	حداکثر توان تولیدی منابع تولید پراکنده
$N^{RCS,max}$	حداکثر تعداد کلیدزنی
N_{Br}	تعداد خطوط
N_{B}	تعداد شین
N_{w}	تعداد سناریوها
$Q^{r,max}$	حداکثر توان راکتیو تولیدی منابع جبرانساز
P^{D}	توان اکتیو تقاضا
Q^{D}	توان راکتیو تقاضا

مسئله پیشنهادی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی است که دارای تابع هدف و قیود می‌باشد. جزئیات تابع هدف به شرح زیر است:

- کمینه‌سازی هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادست
- کمینه‌سازی هزینه انرژی دریافتی از منابع تولید پراکنده
- کمینه‌سازی هزینه انرژی منابع جبرانساز راکتیو
- کمینه‌سازی هزینه قابلیت اطمینان

علاوه بر این قیود مسئله به شرح زیر است:

- معادلات پخش توان

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

- معادلات حاکم بر منابع تولید پراکنده
- معادلات حاکم بر تجدیدآرایش شبکه
- معادلات قابلیت اطمینان
- محدودیت‌های فنی شبکه از قبیل حدود مجاز ولتاژ شین و توان عبوری خطوط

در نهایت با توجه به موارد اشاره شده در بالا، مدل ریاضی مسئله پیشنهادی این مقاله به شرح زیر خواهد بود.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مسئله مذکور در رابطه (۱) بیان شده است.

(۱

$$\min \quad \text{Cost}=\sum_{t\in\varphi_t}\rho_t\left\{P_t^{Sub}+\gamma.EENS_t\right\}+\sum_{i\in\varphi_{dg}}\left(\lambda_i P_{i,t}^{DG}+SU_i v_{i,t}+SD_i w_{i,t}\right)$$

که آن برابر کمینه‌سازی هزینه‌های مختلف موجود در شبکه توزیع مانند هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادست (بخش اول)، هزینه قابلیت اطمینان (بخش دوم) و هزینه انرژی منابع تولید پراکنده (بخش سوم) است. در این رابطه، شاخص مورد استفاده برای قابلیت اطمینان، هزینه خاموشی است که آن برابر حاصلضرب قیمت جریمه خاموشی و انرژی مورد انتظار تغذیه نشده[۱] (EENS) است. علاوه بر این، هزینه انرژی یا بهره‌برداری منابع تولید پراکنده برابر هزینه انرژی، خاموشی و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده است.

۲-۲- قیود مسئله

همانطور که بخش قبل اشاره شد، قیود مسئله برابر با معادلات پخش توان (اکتیو و راکتیو)، منابع تولید پراکنده ، تجدیدآرایش شبکه، قابلیت اطمینان و محدودیت‌های فنی شبکه است. این قیود در روابط (۲) الی (۳۰) است.

۱. Expected energy not supplied (EENS)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

$$La_{n,t} + A_n^{Sub} P_t^{Sub} + \sum_{i \in \varphi_{dg}} A_{i,n}^{DG} P_{i,t}^{DG} - \sum_{h \in \varphi_n} A_{n,h}^{L} P_{n,h,t}^{L} = P_{n,t}^{D} \qquad \forall n,t \tag{۲}$$

$$A_n^{Sub} Q_t^{Sub} + A_n^{r} Q_t^{r} - \sum_{h \in \varphi_n} A_{n,h}^{L} Q_{n,h,t}^{L} = Q_{n,t}^{D} \qquad \forall n,t \tag{۳}$$

$$P_{n,h,t}^{L} = \left\{ g_{n,h} \left(V_{n,t} \right)^2 - V_{n,t} V_{h,t} \left\{ g_{n,h} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) + b_{n,h} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \right\} \right\} sw_{n,h,t} \quad \forall n,h,t \tag{۴}$$

$$Q_{n,h,t}^{L} = \left\{ -b_{n,h} \left(V_{n,t} \right)^2 + V_{n,t} V_{h,t} \left\{ b_{n,h} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) - g_{n,h} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \right\} \right\} sw_{n,h,t} \quad \forall n,h,t \tag{۵}$$

$$A_n^{Sub} \theta_{n,t} = 0 \quad \forall n,t \tag{۶}$$

$$N_{n,h}^{RCS} = \sum_{t \in \varphi_t} \left| sw_{n,h,t} - sw_{n,h,t-1} \right| \qquad \forall n,h \tag{۷}$$

$$N_{n,h}^{RCS} \le N_{n,h}^{RCS,\max} \qquad \forall n,h \tag{۸}$$

$$N_{L,t} = N_{Br} - N_B + 1 \qquad \forall t \tag{۹}$$

$$\left(P_{n,h,t}^{L} \right)^2 + \left(Q_{n,h,t}^{L} \right)^2 \le \left(S_{n,h}^{L,\max} \right)^2 \quad \forall n,h,t \tag{۱۰}$$

$$\left(P_t^{Sub} \right)^2 + \left(Q_t^{Sub} \right)^2 \le \left(S^{Sub,\max} \right)^2 \quad \forall t \tag{۱۱}$$

$$V_n^{\min} \le V_{n,t} \le V_n^{\max} \quad \forall n,t \tag{۱۲}$$

$$S_i^{DG,\min} u_{i,t} \le P_{i,t}^{DG} = or \le S_i^{DG,\max} u_{i,t} \quad \forall i,t \tag{۱۳}$$

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} \le v_{i,t} \quad \forall i,t \tag{۱۴}$$

$$u_{i,t-1} - u_{i,t} \le w_{i,t} \quad \forall i,t \tag{۱۵}$$

$$Q_r^{r,\min} \le Q_{r,t}^{r} \le Q_r^{r,\max} \quad \forall r,t \tag{۱۶}$$

$$EENS_t = \sum_{n \in \varphi_n} La_{n,t} \quad \forall t \tag{۱۷}$$

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

قیود (۲) الی (۶) مرتبط با معادلات پخش توان هستند که به ترتیب نمایان‌گر، تعادل توان اکتیو در هر باس و هر لحظه، تعادل توان راکتیو در هر باس و هر لحظه، توان اکتیو عبوری از خط مابین باس n و h، توان راکتیو عبوری از خط مابین باس n و h، میزان زاویه باس بالادست می‌باشند. توجه شود که کلیدها برروی خط سوار هستند. بنابراین اگر کلیدی وصل باشد (یعنی یک)، پس خط در شبکه موجود است و رابطه (۴) و (۵) در مسئله ظاهر خواهند شد. ولی اگر کلیدی قطع باشد (یعنی صفر)، پس خط در شبکه موجود نیست و رابطه (۴) و (۵) در مسئله ظاهر نخواهند شد. قیود (۷) الی (۹) بیانگر قیود تجدیدآرایش شبکه است که به ترتیب برابر با محاسبه تعداد کلیدزنی هر کلید در طول شبانه‌روز، محدودیت تعداد کلیدزنی و تعداد حلقه موجود در شبکه هستند. متناسب با قید (۳۹)، ساختار شبکه توزیع همواره برابر شعاعی است. قیود فنی ریزشبکه یعنی محدودیت توان عبوری خطوط، توان شبکه بالادست و ولتاژ شین در قیود (۱۰) الی (۱۲) بیان شده است [۲۰].

شایان ذکر است که قید منابع تولید پراکنده در روابط (۱۳) الی (۱۵) ذکر شده است که مربوط به محدودیت ظرفیت آنها، لحظه راه‌اندازی و لحظه خاموشی می‌باشند. توجه شود که در رابطه (۱۳)، عبارت مساوی برای واحدهای باد و سیستم‌های فتوولتائیک است و عبارت نامساوی برای انواع دیگر منابع تولید پراکنده است. قید (۱۶) مروب طبه محدودیت تولید توان راکتیو برای منابع جبرانساز است که برای هر کدام باید لحاظ گردد. در نهایت انرژی مورد انتظار تغذیه نشده در رابطه (۱۷) محاسبه شده است که آن برابر با مجموع تقاضاهای تغذیه نشده در شبکه است.

۲-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت براساس تولید سناریو

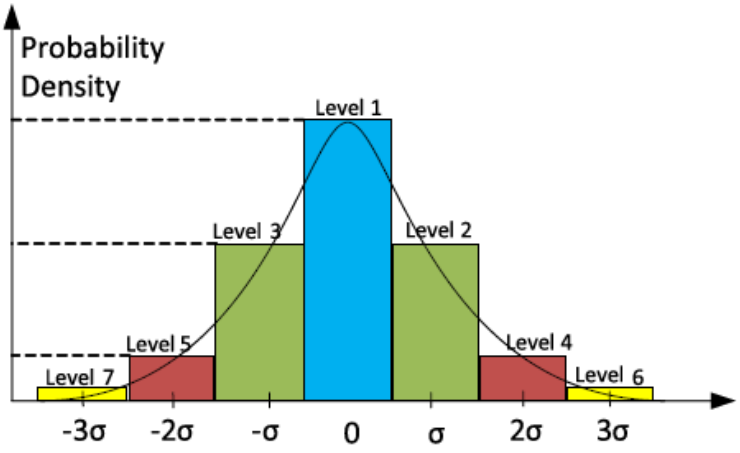
مسئله ارائه شده در بخش‌های قبل در عدم قطعیت‌های است که برابر با عدم قطعیت-های تقاضا اکتیو و راکتیو، قیمت انرژی، و توان اکتیو برخی از منابع تولید پراکنده می-باشند. لذا مدل مسئله پیشنهادی بایستی برای هر سناریو تکرار شود و از این مدل مسئله پیسنهادی به‌صورت مسئله تصادفی[۱] خواهد بود. در اولین گام سناریوهای مربوطه تولید می‌گردد. در روش پیشنهادی، هر پارامتر عدم قطعیت برای اساس تابع

۱. Stochastic problem

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

چگالی احتمال[۱] تعیین خواهد شد. محدوده هر تابع چگالی احتمال به دو عبارت تکه-های مجزا و یا سطوح احتمال تقسیم‌بندی می‌شود [۱۸]. هر سطح احتمال بیان‌گر یک خطای خاص پیش‌بینی/مدل‌سازی در پارامتر عدم قطعیت متناظر است. به‌عنوان مثال شکل (۱) یک تابع چگالی احتمال نرمال با هفت سطح احتمال را نمایش می‌دهد. فرآیند تولید سناریو در این بخش براساس مکانیزم چرخ رولت[۲] (RWM) است. در هر سناریو و برای هر پارامتر عدم قطعیت، تعداد عبارت تصادفی در محدوده صفر الی یک تولید می‌شود. این تعداد عبارت‌های تصادفی در یک سطح تابع چگالی احتمال متناظر که نماین‌گر احتمال حضور برخی خطاها در متغیر عدم قطعیت است، فرو می‌روند [۱۸]. در نهایت این فرآیند برای همه متغیرهای عدم قطعیت تکرار می‌شوند تا اینکه همه سناریوهای ممکن ساخته شوند.

در گام دوم با توجه به اینکه تعداد سناریوهای تولیدی بالا است که منجر به افزایش حجم محاسبات و کاهش سزعت حل مسئله می‌شود، لذا بایستی تعداد سناریوها کاهش یابد. در این مقاله از روش کاهش سناریو برگشتی همزمان به علت محاسبات ساده آن استفاده می‌شود [۱۸]. در این روش فاصله بین سناریوها محاسبه شده و سپس امکان‌پذیرترین سناریو انتخاب می‌شود. مراحل این روش به شرح زیر است:



۱. Probability density function (PDF)

۲. Roulette wheel mechanism (RWM)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

شکل ۱. تابع چگالی احتمال نرمال [۱۸]

۱- محاسبه فاصله بین دو سناریو: این روند براساس رابطه زیر انجام می‌شود:

$$DT_{ee'} = DT(R_e, R_{e'}) = \sqrt{\sum_{g=1}^{w}(r_{eg} - r_{e'g})^2} \quad \forall e, e' = 1, 2, ..., N_w \tag{۱۸}$$

در رابطه بالا، R_e برابر یک سناریو تولید شده است.

۲- کمترین فاصل با دیگر سناریوها برای هر سناریو R_e تعیین شود. یعنی داریم:

$$DT_{el} = \min \ DT_{ee'} \quad \forall e, e' = 1, 2, ..., N_w; e' \neq e \tag{۱۹}$$

که l تعدا سناریوهایی با کمترین فاصله از سناریو w را نگهداری می‌کند.

۳- ضرب احتمال هر سناریو pr_eبا کمترین فاصله از دیگر سناریوها:

$$PD_{e'l} = pr_l \times DT_{e'l} \quad \forall e' = 1, 2, ..., N_w \tag{۲۰}$$

۴- سناریوی d را با کمترین مقدار برای معیار زیر از سناریوهای اولیه تعیین کنید.

$$PD_d = \min \ PD_e \quad \forall e = 1, 2, ..., N_w \tag{۲۱}$$

$$\xi = \xi - \{d\}, \ DS = DS + \{d\}, \ \ pr_l = pr + pr_d \tag{۲۲}$$

که ξ معرف مجموعه سناریو است.

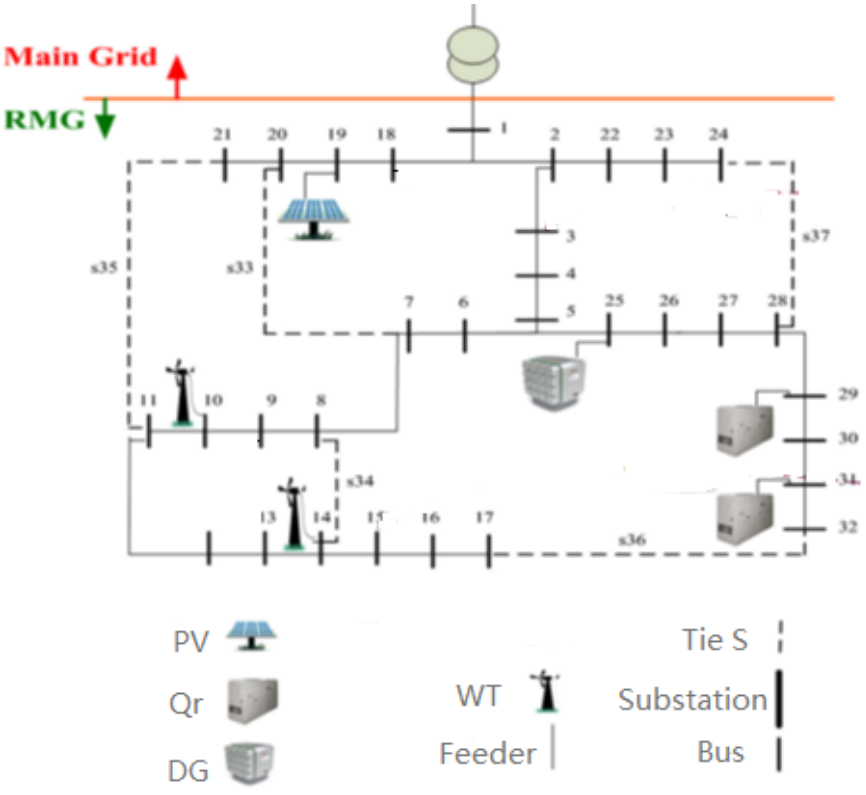
۵- تکرار گام‌های ۲ تا ۴ تا زمان رسیدن به تعداد سناریو مورد انتظار

۳- نتایج شبیه‌سازی

مدل مسئله پیشنهادی برروی شبکه توزیع ۳۲ باسه استاندارد IEEE اعمال شده است که ساختار آن در شکل (۲) نمایش داده شده است [۱۸]. همچنین داده‌های خطوط این شبکه در جدول (۳) بیان شده است و همچنین داده‌های تقاضا اکتیو و راکتیو شبکه نیز برای ساعات پیک تقاضا (ساعت ۲۱:۰۰) به‌صورت جدول (۴) است. علاوه بر این، منحنی تقاضا روزانه کل شبکه از دید سمت MG به‌صورت شکل (۳) است. براساس این شکل، بیشتر میزان تقاضا در ساعت ۲۱:۰۰ رخ می‌دهد و آن برابر ۳۷۰۰ است. شبکه مذکور دارای ولتاژ و توان مبنای ۱۲/۶۶ کیلوولت و ۱۰۰۰ کیلوواتی است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

همچنین کمینه و بیشینه ولتاژ در هر باس به ترتیب برابر ۰/۹ و ۱/۰۵ پریونیت است. علاوه بر این قیمت انرژی الکتریکی به‌صورت شکل (۴) است. همچنین قیمت جریمه انرژی تغذیه نشده ۱۰ برابر قیمت انرژی فرض شده است [۲۲]. شایان ذکر است که شبکه مذکور دارای ۵ تای سوئیچ و ۳۲ کلید سکشنالیزیگ است که تای سوئیچ برروی خطوط چین‌دار سوار هستند. همچنین کلیدهای سکشنالیزیگ برروی خطوط پر سوار هستند. همچنین در نقطه PCC و یا MG یک مدار شکن وجود دارد. علاوه بر این در ابتدای هر فیدر یک سکشنالیزیگ وجود دارد. علاوه بر این حداکثر تعداد کلیدزنی هر سوئیچ برابر با ۱۶ فرض شده است [۱۸].



شکل ۲. ساختار شبکه توزیع مورد مطالعه [۱۸].

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

جدول ۳. مشخصات خطوط شبکه مورد مطالعه [۱۸].

خطوط پر									
ردیف	خط	R (Ω)	X (Ω)	Cap (pu)	ردیف	خط	R (Ω)	X (Ω)	Cap (pu)
۱	۱-۰	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷۰	۴/۶	۱۷	۱۷-۱۶	۰/۷۳۲۰	۰/۵۷۴۰	۰/۱۰
۲	۲-۱	۰/۴۹۳۰	۰/۲۵۱۱	۴/۱	۱۸	۱۸-۱	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۶۵	۰/۵۰
۳	۳-۲	۰/۳۶۶۰	۰/۱۸۶۴	۲/۹	۱۹	۱۹-۱۸	۱/۵۰۴۲	۱/۳۵۵۴	۰/۵۰
۴	۴-۳	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۲/۹	۲۰	۲۰-۱۹	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۰/۲۱
۵	۵-۴	۰/۸۱۹۰	۰/۷۰۷۰	۲/۹	۲۱	۲۱-۲۰	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۰/۱۱
۶	۶-۵	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۹۹	۱/۵	۲۲	۲۲-۲	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	۱/۰۵
۷	۷-۶	۰/۷۱۱۴	۰/۲۳۵۱	۱/۰۵	۲۳	۲۳-۲۲	۰/۸۹۸۰	۰/۷۰۹۱	۱/۰۵
۸	۸-۷	۱/۰۳	۰/۷۴	۱/۰۵	۲۴	۲۴-۲۳	۰/۸۹۶۰	۰/۷۰۱۱	۰/۵۰
۹	۹-۸	۱/۰۴۴	۰/۷۴	۱/۰۵	۲۵	۲۵-۵	۰/۲۰۳۰	۰/۱۰۳۴	۱/۵
۱۰	۹-۱۰	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵	۱/۰۵	۲۶	۲۶-۲۵	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷	۱/۵
۱۱	۱۰-۱۱	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۱/۰۵	۲۷	۲۷-۲۶	۱/۰۵۹	۰/۹۳۳۷	۱/۵
۱۲	۱۱-۱۲	۱/۴۶۸۰	۱/۱۵۵۰	۰/۵۰	۲۸	۲۸-۲۷	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶	۱/۵
۱۳	۱۲-۱۳	۰/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۰/۴۵	۲۹	۲۹-۲۸	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵	۱/۵
۱۴	۱۳-۱۴	۰/۵۹۱۰	۰/۵۲۶۰	۰/۳۰	۳۰	۳۰-۲۹	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳۰	۰/۵
۱۵	۱۴-۱۵	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵۰	۰/۲۵	۳۱	۳۱-۳۰	۰/۳۱۰۵	۰/۳۶۱۹	۰/۵
۱۶	۱۵-۱۶	۱/۲۸۹۰	۱/۷۲۱۰	۰/۲۵	۳۲	۳۲-۳۱	۰/۳۴۱۰	۰/۵۳۰۲	۰/۱

خطوط چین‌دار							
ردیف	خطوط	R (Ω)	X (Ω)	ردیف	خطوط	R (Ω)	X (Ω)
۳۳، ۳۴، ۳۵	۷-۲۰، ۸-۱۴، ۱۱-۲۱	۲	۲	۳۶، ۳۷	۱۷-۳۲، ۲۴-۲۸	۰/۵	۰/۵

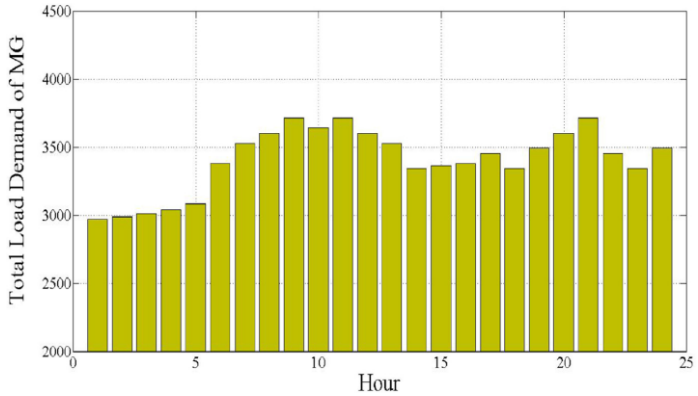
[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

جدول ۴. مشخصات تقاضا اکتیو و راکتیو شین ی شبکه مورد تست [۱۸].

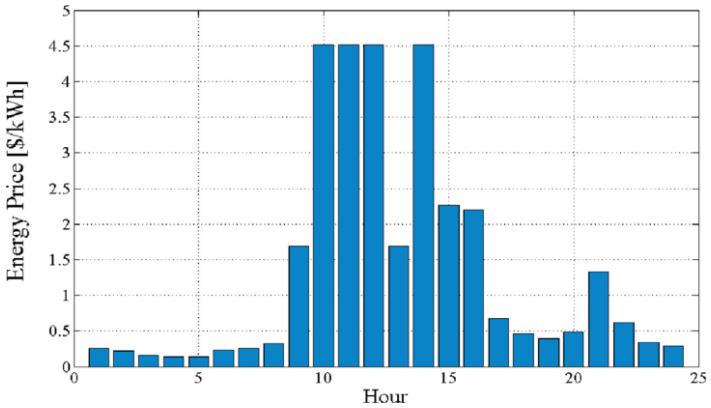
باس	P (kW)	Q (KVAr)	باس	P (kW)	Q (KVAr)
۱	۱۰۰	۶۰	۱۷	۹۰	۴۰
۲	۹۰	۴۰	۱۸	۹۰	۴۰
۳	۱۲۰	۸۰	۱۹	۹۰	۴۰
۴	۶۰	۳۰	۲۰	۹۰	۴۰
۵	۶۰	۲۰	۲۱	۹۰	۴۰
۶	۲۰۰	۱۰۰	۲۲	۹۰	۵۰
۷	۲۰۰	۱۰۰	۲۳	۴۲۰	۲۰۰
۸	۶۰	۲۰	۲۴	۴۲۰	۲۰۰
۹	۶۰	۲۰	۲۵	۶۰	۲۵
۱۰	۴۵	۳۰	۲۶	۶۰	۲۵
۱۱	۶۰	۳۵	۲۷	۶۰	۲۰
۱۲	۶۰	۳۵	۲۸	۱۲۰	۷۰
۱۳	۱۲۰	۸۰	۲۹	۲۰۰	۶۰۰
۱۴	۶۰	۱۰	۳۰	۱۵۰	۷۰
۱۵	۶۰	۲۰	۳۱	۲۱۰	۱۰۰
۱۶	۶۰	۲۰	۳۲	۶۰	۴۰

در شبکه توزیع مورد مطالعه، منابع تولید استفاده شده از نوع بادی (WT)، سیستم فتوولتائیک (PV)، منابع تولید پراکنده دیزلی (DG) و منابع جبرانساز توان راکتیو (Qr) است. مکان هر کدام از واحدها در شکل (۲) نمایان شده است. همچنین مشخصات هر کدام از منابع تولید پراکنده در جدول (۵) مشخص شده است. درصد توان خروجی پیش‌بینی شده واحد بادی و سیستم فتوولتائیک در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است [۱۸].

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]



شکل ۳. کل تقاضا دیده شده از سمت MG [۱۸].

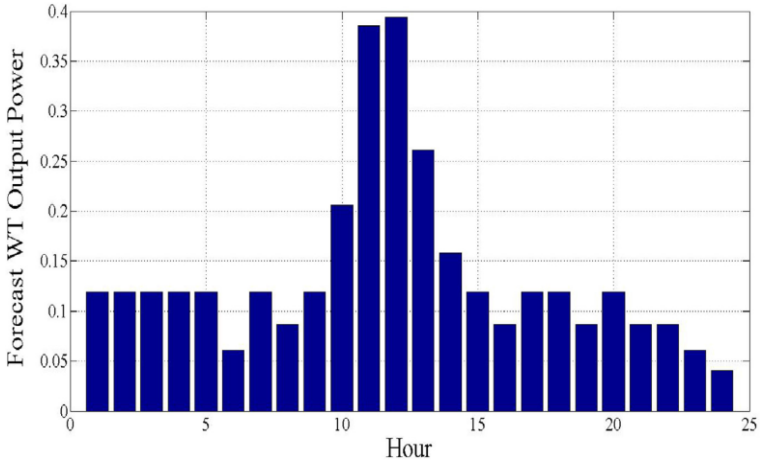


شکل ۴. قیمت انرژی از سمت پست [۱۹].

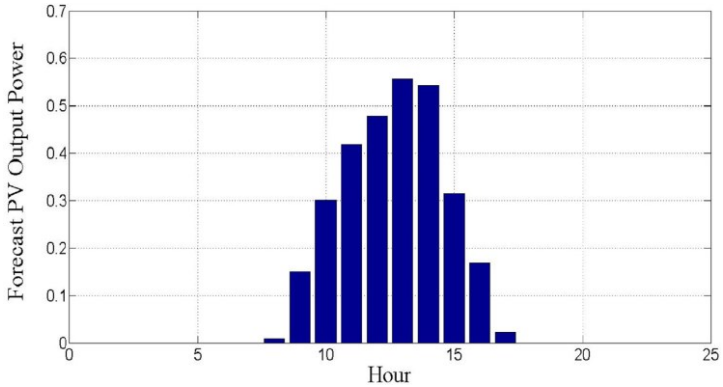
جدول ۵. مشخصات منابع تولید پراکنده DG [۱۸].

نوع	باس	حداقل توان (کیلووات)	حداکثر توان (کیلووات)	حداقل توان (کیلووار)	حداکثر توان (کیلووار)	قیمت انرژی (دلار بر کیلووات/کیلووار ساعت)	هزینه راه-اندازی/ خاموشی (دلار)
WT-۱	۱۰	–	۱۵۰۰	–	–	–	–
WT-۲	۱۴	–	۱۸۰۰	–	–	–	–
PV	۱۹	–	۲۰۰۰	–	–	–	–
DG	۲۵	۸۰	۱۰۰۰	–	–	۰/۲۹۴	۱/۶۵
Qr-۱	۲۹	–	–	۱۰۰	۱۵۰۰	۰/۴۵۷	۰/۹۶
Qr-۲	۳۱	–	–	۱۰۰	۱۵۰۰	۰/۴۵۷	۰/۹۶

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]



شکل ۵. درصد توان خروجی پیش‌بینی شده برای واحد بادی [۱۸].



شکل ۶. درصد توان خروجی پیش‌بینی شده برای سیستم فتوولتائیک [۱۸].

در نهایت توجه شود که پارامترهای عدم قطعیت مسئله پیشنهادی برابر تقاضا اکتیو و راکتیو، قیمت انرژی الکتریکی، خروجی واحد بادی و سیستم فتوولتائیک هستند که متناسب با تابع چگالی احتمال نرمال رفتار می‌کنند. لذا در ابتدا ۱۰۰۰ سناریو برای آنها تولید می‌شود و سپس به ۲۰ سناریو براساس محاسبات بخش قبل کاهش داده می‌شود.

سپس پنج مورد مطالعاتی برای ارزیابی قابلیت‌های طرح پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به شرح زیر است:

- **مورد مطالعاتی اول:** ارزیابی مسئله بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و تجدیدآرایش شبکه (آنالیز پخش تقاضا شبکه)

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

- **مورد مطالعاتی دوم:** ارزیابی مسئله تنها با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی سوم:** ارزیابی مسئله با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و منابع بادی و خورشیدی با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی چهارم:** ارزیابی مسئله با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده ، منابع بادی و خورشیدی و منابع جبرانساز توان راکتیو با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی پنجم:** ارزیابی مسئله پیشنهادی شامل منابع تولید پراکنده ، منابع بادی و خورشیدی و منابع جبرانساز توان راکتیو و تجدیدآرایش با مدل-سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف

جدول (۶) میزان هزینه قابلیت اطمینان را برای شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف نشان داده است که براساس آن می‌توان گفت، حضور منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در ریزشبکه موجب افزایش این هزینه شده، ولی ارائه طرح پیشنهادی توانسته است که این هزینه را به میزان بالایی کاهش دهد.

جدول ۶. هزینه انرژی و قابلیت اطمینان در موارد مطالعاتی مختلف

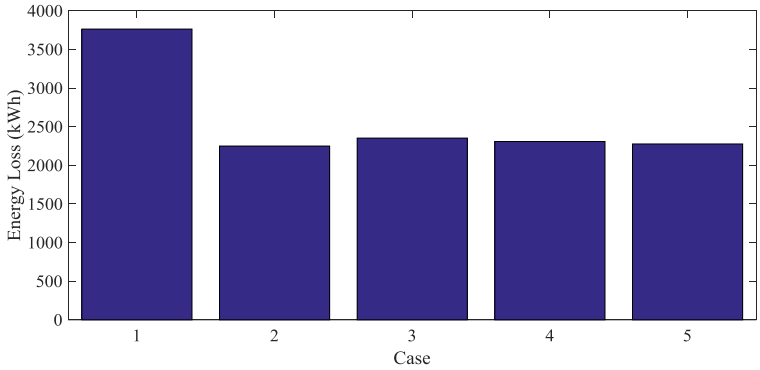
مورد مطالعاتی	هزینه انرژی (دلار)	هزینه قابلیت اطمینان (دلار)
اول	۱۱۳۳۸۱	۲۴۳
دوم	۲۶۵۳۳	۱۸۶
سوم	۲۷۴۴۹	۲۹۸
چهارم	۲۷۲۲۱	۲۱۶
پنجم	۲۶۹۵۳	۱۵۳

ارزیابی شاخص‌های فنی شبکه از قبیل ولتاژ و تلفات در ادامه بیان می‌گردد. شکل (۷) تلفات انرژی را برای موارد مطالعاتی مختلف بیان می‌کند. همانطور براساس این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین تلفات انرژی برای یک شبکه در مورد مطالعاتی اول رخ می‌دهد. به عبارتی، در این مورد مطالعاتی ریزشبکه تنها توان از شبکه بالادست دریافت می‌کند و هیچ منبع توان داخلی در آن استفاده نشده است. از اینرو تلفات انرژی برای آن در این مورد مطالعاتی بالا خواهد بود. در مورد مطالعاتی دوم برای کاهش تلفات انرژی شبکه تنها استفاده از منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است که با مقایسه تلفات

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

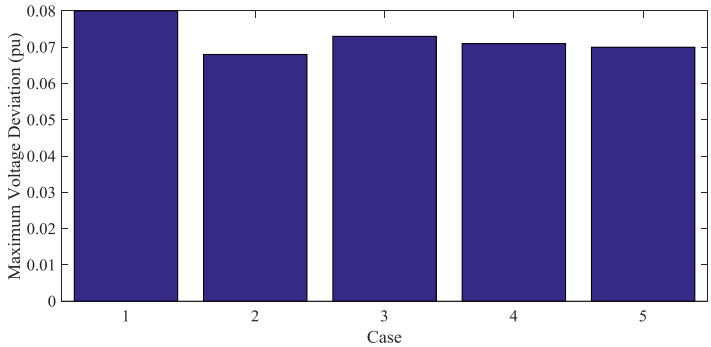
انرژی در دو مورد مطالعاتی اول و دوم می‌توان گفت که حضور منابع تولید پراکنده در ریزشبکه موجب کاهش ۴۰ درصدی تلفات انرژی نسبت به مورد مطالعاتی اول خواهد شد. کاهش تلفات به معنای افزایش طرفیت میزبانی شبکه توزیع است. همچنین براساس نتایج مورد مطالعاتی چهارم، تلفات انرژی با استفاده از منابع جبرانساز توان راکتیو در حدود ۴۴ کیلووات ساعت نسبت به مورد مطالعاتی سوم کاهش یافته است و منجر به افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع شده است. در نهایت تجدیدآرایش شبکه نیز به نوبه خود موجب کاهش ۳۲ کیلووات ساعت تلفات انرژی نسبت به مورد مطالعاتی چهارم و افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع شده است.

شکل (۸) نیز میزان حداکثر انحراف ولتاژ شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف را نشان می‌دهد. براساس این شکل، میزان حداکثر انحراف ولتاژ در مورد مطالعاتی اول برابر ۰/۰۸ پریوینت است. در این مورد مطالعاتی شبکه تنها از طریق شبکه بالادست تغذیه می‌شود و تنها عنصر کنترل ولتاژ آن پست بالادست است. از اینرو در این مورد مطالعاتی، افت ولتاژ نسبت به موارد مطالعاتی دیگر بالاتر است. در مورد مطالعاتی دوم، منابع تولید پراکنده به‌صورت محلی کنترل ولتاژ را نیز انجام می‌دهند. لذا پیرو آن، حداکثر افت ولتاژ برابر ۰/۰۶۸ پریونیت است که نسبت به مورد مطالعاتی اول کاهش قابل توجهی داشته است. مورد مطالعاتی سوم موجب افزایش این افت ولتاژ به علت تغییرات غیرقابل پیش بینی منابع بادی و خورشیدی می‌شود، ولی در مورد مطالعاتی چهارم و پنجم با استفاده از منابع جبرانساز توان راکتیو و تجدیدآرایش شبکه، حداکثر افت ولتاژ توانسته است که نسبت به مورد مطالعاتی سوم کاهش قابل توجهی داشته باشد.



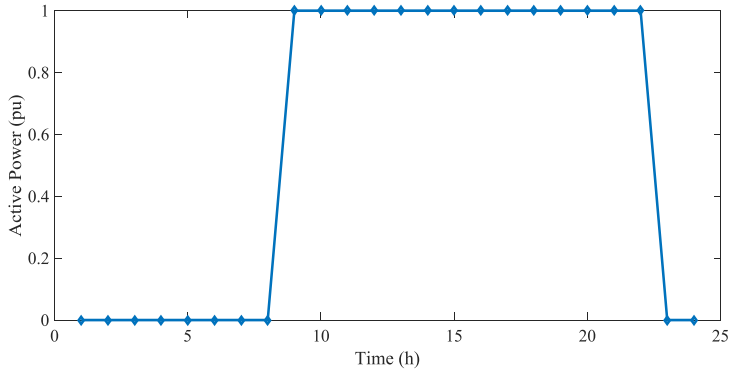
شکل ۸. تلفات انرژی شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]



شکل ۸. حداکثر انحراف ولتاژ در شبکه توزیع برای موارد مطالعاتی مختلف

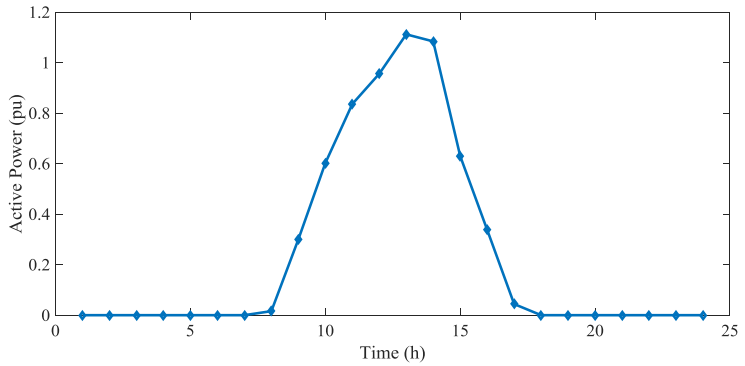
براساس شکل (۹) مشاهده می‌شود که منابع تولید پراکنده دیزلی در ساعت‌های ۱:۰۰ الی ۸:۰۰ و ۲۳:۰۰ الی ۲۴:۰۰ خاموش می‌باشند. این امر بدین دلیل است که در این ساعت، هزینه بهره‌برداری این نوع تولیدات پراکنده نسبت به قیمت انرژی بالاتر است. از اینرو دریافت انرژی در این ساعات توسط این نوع تولیدات پراکنده مقرون به‌صرفه نیست. ولی در ساعات دیگر که قیمت انرژی نسبت به قیمت بهره‌برداری بالا است. از اینرو، منابع تولید پراکنده دیزلی عموماً حداکثر ظرفیت خود را در بیشتر ساعات به شبکه توزیع پیشنهادی تزریق می‌کنند.



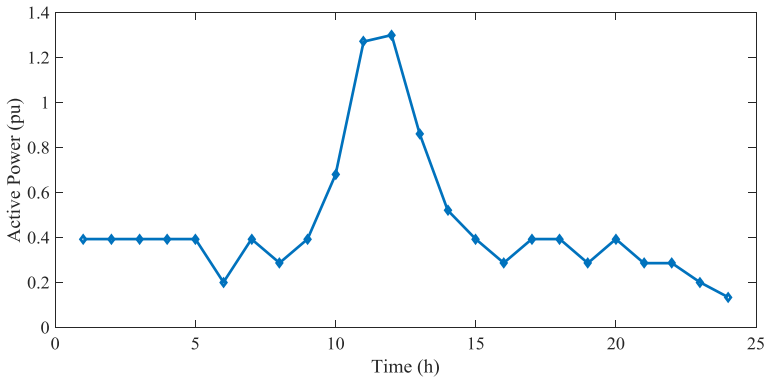
شکل ۹. منحنی روزانه توان اکتیو مجموع پیل‌های سوختی

براساس شکل (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که فتوولتائیک‌ها و سیستم‌های بادی عموماً براساس شکل (۵) و (۶) حداکثر ظرفیت خود را به شبکه توزیع پیشنهادی تزریق می‌کنند. این امر بدین دلیل است که هزینه بهره‌برداری این نوع تولیدات پراکنده براساس جدول (۵) برابر صفر است. از اینرو آنها حداکثر ظرفیت خود را به شبکه تزریق می‌کنند.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]



شکل ۱۰. منحنی روزانه توان اکتیو مجموع فتوولتائیک‌ها



شکل ۱۱. منحنی روزانه توان اکتیو مجموع سیستم‌های بادی

همانطور که براساس نتایج فوق مشاهده شد، طرح پیشنهادی، یعنی تجدیدآرایش شبکه توزیع به همراه استفاده از منابع جبرانساز توان راکتیو نسبت به موارد مطالعاتی دیگر یعنی موارد مطالعاتی اول تا چهارم، قابلیت‌های بهتری از نظر اقتصادی، فنی و قابلیت اطمینان شبکه دارای بودند. این امر منجر به افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر بادی جدید خواهد شد. در نهایت جدول (۷) کلیدهای باز در شبکه توزیع را به ازای هر ساعت بیان می‌کند. به عبارتی این جدول وضعیت عملکرد بهینه کلیدهای شبکه را جهت بهبود شاخص‌های شبکه، افزایش ظرفیت میزبانی و قابلیت اطمینان شبکه را نشان می‌دهد. در نهایت براساس این جدول مشاهده می‌شود که همواره ۵ کلید باز هستند که این امر به دلیل برقراری ساختار شعاعی شبکه توزیع است. زیرا که شبکه مذکور دارای ۳۷ خط و ۳۲ نقطه تقاضا است.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

لذا برای اینکه ساختار شعاعی برقرار باشد، بایستی تعداد خطوط و نقاط تقاضا برابر باشند. از اینرو، همواره پنج کلید باز خواهد بود.

جدول ۷. کلیدهای باز در هر ساعت بعد از تجدیدآرایش شبکه

ساعت	کلیدها					ساعت	کلیدها				
۱	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۱۳	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۱۴	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۳	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۱۵	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۴	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۱۶	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۵	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۱۷	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۶	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۱۸	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۴
۷	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۱۹	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۹
۸	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷	۲۰	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۹	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳	۲۱	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۱۰	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳	۲۲	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۳
۱۱	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۴	۲۴	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷
۱۲	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۲۴	۲۴	۳۳	۱۳	۳۵	۳۶	۳۷

۴- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله « کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده از جبرانسازی توان راکتیو و تجدیدآرایش شبکه » بیان شد. شایان ذکر است که مدل مسئله پیشنهادی به‌صورت مسئله بهینه‌سازی بود که تابع هدف آن برابر با افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی دریافتی از شبکه بالادست، هزینه انرژی منابع تولید پراکنده، بادی و خورشیدی، هزینه تولید توان منابع جبرانسازی توان راکتیو و هزینه قابلیت اطمینان شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود مسئله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر منابع تولید پراکنده و منابع جبرانساز راکتیو، محدودیت‌های فنی شبکه و محدودیت‌های قابلیت اطمینان در شبکه توزیع است شایان ذکر است که در مسئله مذکور پارامترهای عدم قطعیت مختلفی از قبیل تقاضا مصرفی، سطح تابش خورشید، سرعت باد، قیمت انرژی وجود داشت که سناریوهای متناظر با آنها براساس

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

تابع چگالی احتمال نرمال ایجاد شد و سپس با استفاده از روش کاهش سناریو برگشتی، سناریوهای با احتمال رخداد بالا استخراج شدند. در نهایت با ارزیابی نتایج عددی حاصل موارد مطالعاتی مختلف، نتایج کلی زیر استخراج گردید:

- افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده و مدیریت بهینه منابع تولید پراکنده، جبرانساز توان راکتیو و تجدیدآرایش
- کاهش هزینه انرژی در صورت تجدیدآرایش بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده ، منابع جبرانساز توان راکتیو و منابع بادی و خورشیدی نسبت به عدم حضور این ادوات و تجدیدآرایش در شبکه توزیع
- کاهش هزینه قابلیت اطمینان در صورت تجدیدآرایش بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده ، منابع جبرانساز توان راکتیو و منابع بادی و خورشیدی نسبت به عدم حضور این ادوات و تجدیدآرایش در شبکه توزیع
- کاهش تلفات انرژی در صورت تجدیدآرایش بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده ، منابع جبرانساز توان راکتیو و منابع بادی و خورشیدی نسبت به عدم حضور این ادوات و تجدیدآرایش در شبکه توزیع
- کاهش حداکثر میزان افت ولتاژ در صورت تجدیدآرایش بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده ، خودروهای الکتریکی و ذخیره‌سازهای انرژی نسبت به عدم حضور این ادوات و تجدیدآرایش در شبکه توزیع
- برابری تعداد خطوط توزیع و نقاط تقاضا در شبکه توزیع با باز بودن برخی از کلیدها به منظور برقراری ساختار شعاعی در شبکه توزیع

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

Decreasing Renewable Energy Operation Cost to Distribution Network Hosting Capacity Increment by Reconfiguration and Reactive Power Compensation

Behdad Arandian [١]

Department of Electrical Engineering, Dolatabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, (arandian@aut.ac.ir)

Received: ٢٠٢٤/٠٩/١٦ Accepted: ٢٠٢٤/١١/٢٠

Abstract

Due to the concerns caused by the uncontrolled consumption of fossil fuels, governments and organizations are moving towards the use of new technologies with low environmental pollution as the renewable resources such as wind sources. Therefore, it is expected that the capacity of the mentioned resources in the distribution network will increase a lot in the next few years. Therefore, to prevent accidents that can be expected from the lack of management of these elements in the distribution network, there is a need to manage the energy of the mentioned elements and also to reconfiguration the network structure to increase the capacity of the distribution network to use these resources. In addition to this, increasing the number of mentioned elements in the distribution network will increase the uncertainty parameters of the distribution network. Therefore, the operator of the distribution network should be able to perform certain management conditions for all the scenarios resulting from the uncertainty of various parameters, so that in this case the distribution network is able to operate with proper performance. The results show that the use of distributed generations reduces costs by ٧٧٪, and the use of compensation and reconfiguration reduces costs by ١٨٪.

JEL Classification: E٢١, R٠٢, S١٢, C٢٣.

Keywords: Reconfiguration, optimization, reactive power, hosting capacity.

١. Corresponding Author

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

منابع

[۱] غلامی آرین، نیکپور ساغر، میرکی فائزه. بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر شاخص توسعه انسانی در ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴۰۲; ۱۹ (۷۸): ۶۹-۱۰۱.

[۲] کریمی خرمی اصغر، فرهمند محمدرضا، زمانی مقداد. تحلیل تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بر کیفیت محیط‌زیست با توجه به نقش سرمایه انسانی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴۰۱; ۱۸ (۷۵): ۲۲۹-۲۴۴

[۳] Solat, S., Aminifar, F., & Shayanfar, H. Distributed generation hosting capacity in electric distribution network in the presence of correlated uncertainties. IET Generation, Transmission & Distribution, ۲۰۲۰, ۱۵(۵), ۸۳۶-۸۴۸.

[۴] Umoh, V.; Davidson, I.; Adebiyi, A.; Ekpe, U. Methods and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks—A Review. *Energies* ۲۰۲۳, *۱۶*, ۳۶۰۹.

[۵] Kavousi-Fard, A., Niknam, T., and Fotuhi-Firuzabad, M., "Stochastic reconfiguration and optimal coordination of V۲G plug-in electric vehicles considering correlated wind power generation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy,* vol.۶, no.۳, pp.۸۲۲-۸۳۰, ۲۰۱۵.

[۶] S. Nursebo Salih, P. Chen, O. Carlson and L. B. Tjernberg, "Optimizing Wind Power Hosting Capacity of Distribution Systems Using Cost Benefit Analysis," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. ۲۹, no. ۳, pp. ۱۴۳۶-۱۴۴۵, June ۲۰۱۴

[۷] Ghofrani, M., et al., "A Framework for Optimal Placement of Energy Storage Units Within a Power System With High Wind Penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. ۴, no. ۲, pp. ۴۳۴-۴۴۲, ۲۰۱۳.

[۸] Guo, Z., Lei, S., Wang, Y., Zhou, Z., Zhou, Y., "Dynamic distribution network reconfiguration considering travel behaviors and battery degradation of electric vehicles," *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, pp. ۱-۵, ۲۰۱۷.

[۹] J. Tabatabaei, M. S. Moghaddam and J. M. Baigi, "Rearrangement of Electrical Distribution Networks With Optimal Coordination of Grid-Connected Hybrid Electric Vehicles and Wind Power Generation Sources," in IEEE Access, vol. ۸, pp. ۲۱۹۵۱۳-۲۱۹۵۲۴, ۲۰۲۰

[۱۰] Xing, H., Sun, X., "Distributed Generation Locating and Sizing in Active Distribution Network Considering Network Reconfiguration," *IEEE Access*, vol. ۵, pp. ۱۴۷۶۸-۱۴۷۷۴, ۲۰۱۷.

[۱۱] Koutsoukis, N.C., Siagkas, D.O., Georgilakis, P.S., Hatziargyriou, N.D., "Online Reconfiguration of Active Distribution Networks for Maximum Integration of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. ۱۴, no. ۲, pp. ۴۳۷-۴۴۸, April ۲۰۱۷.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]

[۱۲] Vellingiri, Mahendiran, et al. "Maximum hosting capacity estimation for renewables in power grids considering energy storage and transmission lines expansion using hybrid sine cosine artificial rabbits algorithm." *Ain Shams Engineering Journal* ۱۴,۵, ۲۰۲۳: ۱۰۲۰۹۲..

[۱۳] Sedighizadeh M, Shaghaghi-shahr G, Esmaili M, Aghamohammadi MR, "Optimal distribution feeder reconfiguration and generation scheduling for microgrid day-ahead operation in the presence of electric vehicles considering uncertainties", *Journal of Energy Storage*, vol. ۲۱, pp. ۵۸–۷۱, ۲۰۱۹.

[۱۴] E. C. da Silva, O. D. Melgar-Dominguez and R. Romero, "Simultaneous Distributed Generation and Electric Vehicles Hosting Capacity Assessment in Electric Distribution Systems," in IEEE Access, vol. ۹, pp. ۱۱۰۹۲۷-۱۱۰۹۳۹, ۲۰۲۱.

[۱۵] AK Karmaker, K Prakash, MNI Siddique, MA Hossain, H Pota, "Electric vehicle hosting capacity analysis: Challenges and solutions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *۱۸۹*, ۱۱۳۹۱۶., ۲۰۲۴.

[۱۶] Gong, Sicheng, et al. "An extended hosting capacity approach including energy storage." *Distributed Energy Storage in Urban Smart Grids*. Institution of Engineering and Technology (IET), ۲۰۲۳. ۲۲۳-۲۴۷.

[۱۷] H. Wu, Y. Yuan, J. Zhu, K. Qian and Y. Xu, "Potential Assessment of Spatial Correlation to Improve Maximum Distributed PV Hosting Capacity of Distribution Networks," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. ۹, no. ۴, pp. ۸۰۰-۸۱۰, July ۲۰۲۱,

[۱۸] Ahmadi, Bahman, Oguzhan Ceylan, and Aydogan Ozdemir. "Reinforcement of the distribution grids to improve the hosting capacity of distributed generation: Multi-objective framework." *Electric Power Systems Research* **۲۱۷,۲۰۲۳**, **۱۰۹۱۲۰**..

[۱۹] H. Akhavan-Hejazi, and H. Mohsenian-Rad, "Optimal operation of independent storage systems in energy and reserve markets with high wind penetration," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.۵, no.۲, pp.۱۰۸۸-۱۰۹۷, March ۲۰۱۴.

[۲۰] F Hu, X Zhan, B Arandian, " Optimization of microenergy grid including adiabatic compressed air energy storage by considering uncertainty of intermittent parameters", *Energy Science & Engineering*, ۲۰۲۱

[۲۱] LEE, Seungmin, et al. Strategy for Enhancing Hosting Capacity of Distribution Lines Using a Vertical Photovoltaic System. *Energies*, ۲۰۲۴, ۱۷,۶: ۱۳۹۰.

[۲۲] آرندیان بهداد، محمدی اردهالی مرتضی. بهینه‌سازی اندازه، مکان و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۳۹۷; ۱۴ (۵۷) :۱-۳۷.

[Downloaded from iiesj.ir on 2026-01-29]