در نظر گرفتن منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده (DG) در بازیابی بار شبکه توزیع

شاهین ریاحی نیا[1] و علی عباسپور طهرانی فرد [1]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
–shahinriahinia@gmail.com - abbaspour@sharif.edu

چکیده: در این مقاله یک چارچوب بازیابی بار در شبکه توزیع انرژی که شامل تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی می باشد، پیشنهاد می شود. در این چارچوب از روش برنامه ریزی پویا (DP) به عنوان ابزار بهینه سازی مساله بازیابی بار شبکه توزیع استفاده شده است. زمان و ترتیب برق دار کردن فیدرهای (بارهای) شبکه توزیع بعد از خاموشی سراسری اتفاق افتاده، به عنوان مراحل و جواب بهینه مساله بهینه سازی روش برنامه ریزی پویا در نظر گرفته می شود. روش پیشنهادی اولویت بارهای شبکه را نیز بر اساس اهمیت آن، در مساله بازیابی در نظر می گیرد. در انتها روش پیشنهادی در یک شبکه واقعی پیاده سازی شده و بر اساس نتایج به دست آمده کارآمد و عملی بودن آن استنتاج شده است.

واژه های کلیدی: بازیابی بار، منابع ذخیره انرژی، تولیدات پراکنده، برنامه ریزی پویا و اولویت بار

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول : علی عباسپور طهرانی فرد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

۱- مقدمه

فرآیند بازگردانی شبکه‌ی قدرت متشکل از سه بخش عمده تولید، انتقال و توزیع، به حالت عادی خود پس از مواجه شدن با خطا و قطعی را بازیابی سیستم قدرت گویند. بازیابی سیستم قدرت بعد از خاموشی سراسری یکی از مهم ترین وظایف بهره بردار سیستم قدرت به شمار می رود. بازیابی یک فرآیند تصمیم‌گیری است که بهره‌بردار سیستم اتخاذ می‌کند تا میزان قطعی سیستم و پیامدهای ناشی از آن را را بهبود ببخشد.

بازیابی بار که از آن به بازیابی سیستم توزیع نیز یاد می‌شود، اخیراً در کانون توجه محققین قرار گرفته است. همانطور که پیش تر بیان شد هدف اصلی بازیابی سیستم توزیع، کمینه نمودن آثار ناشی از قطعی است. این مهم با یافتن ترتیب و زمان‌های بهینه فیدرهایی که می‌بایست بازیابی شوند به دست می‌آید.

الگوریتم های شبکه های مصنوعی عصبی [۱]، منطق فازی [۲] و ژنتیک [۳] نیز روش های نوینی است که رفتار بهره بردار سیستم را برای برنامه بازیابی شبیه سازی کرده اند. عیب بزرگ این روش ها، نیاز به اطلاعات و جزییات زیاد برای انجام بهینه سازی، به خصوص در سیستم های با مقیاس بزرگ است. عیب دیگر آن این است که در هنگام آموزش روش موردنظر برای شبیه‌سازی این امکان وجود دارد که همه‌ی پدیده‌های مؤثر و موردنیاز برای محاسبه دقیق جواب در نظر گرفته نشوند.

روش های دیگری نیز پیشنهاد شده است که از ابزارهای بهینه سازی مرسوم برای رسیدن به جواب دقیق و حل مساله بازیابی بهره می برد. از میان آن می توان به روش های برنامه ریزی پویا [۴]، روش مبتنی بر لاگرانژ [۵] و روش مبتنی بر اولویت [۶] اشاره کرد. این تکنیک ها با استفاده با مدلسازی مناسب و تخمین های مناسب فرآیند برنامه بازیابی را بهینه می کنند.

بررسی‌های اخیر بر این حقیقت تأکید کرده‌اند که با افزایش تعداد چنین خودروهایی و اتصال آن‌ها به شبکه، بار جدید قابل‌توجهی به شبکه‌های قدرت تحمیل خواهد شد [۷ و ۸]. از طرفی، برخلاف بسیاری از بارهای الکتریکی، خودروهای الکتریکی مجهز به باتری می‌باشند که توانایی ذخیره انرژی و به تعویق انداختن مصرف انرژی را برای آن‌ها فراهم می‌سازد [۹]. از سوی دیگر، این خودروها می‌توانند با جذب توان از شبکه در زمان‌های کم باری و تزریق توان به شبکه در مواقع نیاز، به کمک شبکه‌های قدرت آینده بیایند [۱۰].

ورود تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی در شبکه های توزیع علاوه بر تحت تاثیر قرار دادن شبکه و مواجهه کردن آن با چالش های جدید، مساله بازیابی بار را نیز تحت الشعاع خود قرار خواهد داد. هیچ کدام از مقالات بررسی شده در بالا، تاثیر و مشارکت منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده را در بازیابی بار در نظر نگرفته اند. در این مقاله مدلی تحلیلی جهت دخیل کردن توان در دسترس منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده به همراه فرمولاسیون ریاضی آن ارائه می شود.

مبنای فرآیند بازیابی شبکه توزیع در این مقاله، الگوریتم بهبود یافته برنامه ریزی پویا می باشد. برنامه ریزی پویا بر پایه ی اصل بهینه سازی بلمن استوار است. برنامه ریزی پویا یک ابزار بهینه سازی مقاوم برای تحلیل اصول بهره برداری سیستماتیک است. اغلب راه حل های شناخته شده در مساله بازیابی شبکه توزیع به فرضیات پس از رفع خطا یا قطعی بستگی دارد. همچنین اغلب فرض می شود که اطلاعات محلی جهت بازیابی در دسترس بوده و امکان برق دار شدن شبکه از نقاط مختلف وجود دارد. در این مقاله ساختار شبکه توزیع به صورت شعاعی در نظر گرفته شده و فرض شده است که یک خطای گسترده باعث به وجود آمدن خاموشی سراسری شبکه شده است.

نوآوری های این مقاله شامل موارد زیر است:

- در نظر گرفتن منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده در بازیابی بار و مدلسازی انواع نحوه مشارکت آن ها در مساله بازیابی شبکه توزیع انرژی الکتریکی
- در نظر گرفتن رتبه بندی بارهای شبکه بر اساس میزان اهمیت آن در مطالعات بازیابی
- پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی بازیابی بار شبکه توزیع انرژی الکتریکی در شبکه تست عملی و کارآمد بودن روش پیشنهادی

۲- توصیف مسئله و نحوه حل

بازیابی توزیع بر روی برق‌دار کردن مجدد سیستم و کمینه کردن آثار قطعی آن تمرکز دارد. این کار پس از بازیابی قسمتی از بخش‌های اصلی تولید و انتقال و پایداری آن انجام می‌گیرد. به عبارتی دیگر سیستم به شرایطی می‌رسد÷ که کنترل تغییرات فرکانس و ولتاژ شبکه، برای اتصال واحدهای تولیدی و یا بار به آن، از اهداف اصلی بهره‌بردار به شمار نمی‌آید.

فرآیند بازیابی سیستم توزیع را می توان به صورت یک مساله بهینه سازی مشروط به قیود و محدودیت هایی از جمله توان تولیدی در دسترس، تعادل توان حقیقی، محدودیت یکبار کلیدزنی و نیز عدم قطعیت تعریف نمود. مسئله کلی بازیابی توزیع به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min \ F(x) \tag{۱}$$

St.

$$G_i(x) = 0, \ \ i = 1,...,m \tag{۲}$$

$$H_j(x) \le 0, \ j = 1,...,n \tag{۳}$$

که در آن $F(x)$ تابع هدف مسئله بازیابی، $G(x)$ و $H(x)$ به ترتیب قیود مساوی و نامساوی سیستم و x متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله موردنظر می‌باشند. در این مقاله از انرژی تامین نشده به عنوان تابع هدف مساله بهینه سازی استفاده می شود. انرژی تأمین نشده عدم توانایی سیستم را در تأمین بار الکتریکی اندازه‌گیری می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

در نتیجه، هدف مساله بازیابی بار شبکه توزیع کمینه کردن انرژی تامین نشده (UE)، با تعیین زمان برق دار شدن هریک از فیدرهای شبکه می باشد. محاسبه صحیح انرژی تأمین نشده به عواملی همچون بار شبکه و توان تولیدی در دسترس بستگی دارد. انرژی تامین نشده یک سیستم به‌طورکلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$UE = \sum_{i=1}^{N} P_i \times t_i \qquad (۴)$$

که در آن P_i میزان بار در فیدر i ام، t_i زمان بازیابی i امین فیدر و N تعداد کل فیدرهای پست‌های شبکه توزیع مورد مطالعه می‌باشد. جواب مسئله DSR یک برنامه بازیابی است که زمان‌های سوییچ زنی فیدرهای موجود $[t_1, t_2, \ldots, t_N]$ را می‌دهد.

لازم به ذکر است برای در نظر گرفتن هزینه کلیدزنی می بایست از هزینه انرژی تامین نشده برای تابع هدف استفاده نمود تا بتوان اثر هزینه کلیدزنی در مساله بهینه سازی در نظر گرفت. برای این کار نیاز به هزینه قطعی مشترکین ($VOLL$) می باشد که حاصلضرب آن در UE هزینه انرژی تامین نشده مورد نظر به دست خواهد آمد.

۲-۱- محدودیت‌ها

۲-۱-۱- تعادل توان حقیقی:

محدودیت اصلی بازیابی سیستم توزیع، تعادل توان حقیقی است. این قید به توان حقیقی در دسترس (P_G) و توان حقیقی مصرفی (P_L) بستگی دارد که در رابطه (۷) نشان داده شده است.

$$P_G \geq P_L \qquad (۵)$$

با توجه به اینکه این عامل گذرا و در شرایط برق دار نمودن بارها می باشد و در حالت ماندگار خنثی می شود لذا در ابتدای کلید زنی در شرط تعادل توان حقیقی یک پارامتر ($CLPU$) قرار داده که این میزان نسبتی از میزان بار فیدر مورد نظر می باشد که بر اساس نوع بار آن ضرایب مختلفی خواهد گرفت و پس از اینکه بار مورد نظر با شرایط جدید برقدار شد در انتهای هر مرحله ضریب مورد نظر صفر خواهد شد و در میزان انرژی تامین نشده مساله بهینه سازی حساب نخواهد شد. برای در نظر گرفتن اثر CLPU در مطالعات بازیابی بار می بایست محدودیت (۵) به صورت (۶) اصلاح گردد.

$$P_G \geq P_L + CLPU, \quad \forall t \in [0, t_R] \qquad (۶)$$

که در آن $CLPU$ ضریبی از بار فیدر متناظر می باشد که بسته به نوع بار آن می تواند متفاوت باشد.

۲-۱-۲- محدودیت یک‌بار کلید زنی

به‌طورکلی مطلوب است که از برق‌دار و بی‌برق شدن فیدر در چندین زمان در طول مدت فرآیند بازیابی جلوگیری به عمل آید. بنابراین هنگامی‌که یک کلید عمل نمود تا پایان فرآیند بازیابی در این حالت باقی خواهد ماند.

۲-۲- حل مسئله بازیابی با استفاده از DP

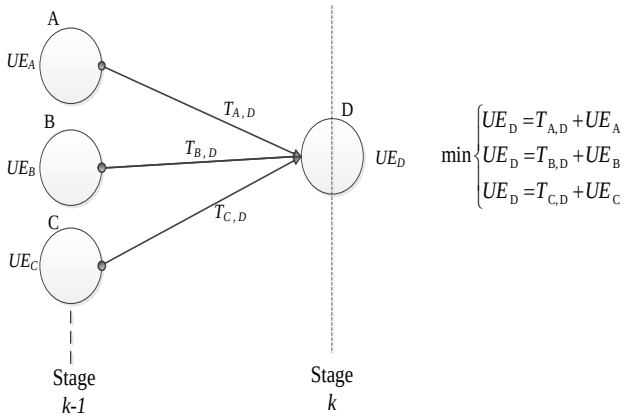
الگوریتم برنامه ریزی پویا برای یافتن بهترین توالی بازیابی بار که میزان انرژی تامین نشده را حداقل می‌کند، به کار گرفته می شود. مزیت مهم این الگوریتم بدست آوردن جواب بهینه مطلق مساله بهینه سازی است. علاوه بر این برنامه‌ریزی پویا قابلیت حل مسایل ناپیوسته شامل متغیرهای گسسته و عدد صحیح را دارا می باشد [۱۱ و ۱۲]. همچنین در مقایسه با الگوریتم لاگرانژ ارائه شده در [۵] که وضعیت فیدرها را در هر بازه زمانی مشخص پیدا می کند، روش برنامه ریزی پویا توالی بهینه را می یابد. این توالی یک بردار N بعدی شامل زمان برق دار شدن هر یک از بارها است. در این حالت N تعداد فیدرهایی (بارهایی) است که می بایست بازیابی شوند. روش حل مساله برنامه ریزی پویا جهت مراجعه برای علاقه مندان به این روش بهینه سازی در [۱۳] آمده است.

بخش مهم دیگر در برنامه ریزی پویا پیکان (آرک) است. پیکان ها نشان دهنده مسیرهای ممکن برای رسیدن به حالت مرحله بعدی است. در بازیابی بر پایه برنامه ریزی پویا، یک پیکان بیان کننده فیدری است که نیاز دارد برق دار شود تا از حالتی از مرحله k-1 ام به حالت دیگر بخصوصی از مرحله k برسد. نحوه محاسبه میزان UE_Arc به صورت رابطه (۷) خواهد بود.

$$UE_Arc = [(\text{Total_Load}) - (\sum_{i=1}^{k-1} L_i)] \times [t_k - t_{k-1}] \qquad (۷)$$

که در آن $Total\ load$ مجموع بارهای سیستم که می بایست بازیابی شوند و $\sum_{i=1}^{k-1} L_i$ میزان تجمعی بار بازیابی شده تا مرحله k ام می باشد. t_k و t_{k-1} نیز به ترتیب زمان بازیابی مرحله k (مرحله فعلی) و مرحله k-1 (مرحله قبلی) است.

در عملکرد دوم، مادامی که همه زیرمساله های بهینه بدست آمد، الگوریتم ترکیب این زیرمساله های بهینه را که منجر به مسیر بهینه کلی می شود را پیدا می کند.



شکل (۱): فرآیند بهینه سازی زیرمساله برنامه ریزی پویا

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

۲-۳- اولویت بار

اولویت بار تعیین می کند که کدام یک از بارهای شبکه برای بازیابی از اهمیت بالاتری نسبت به سایر بارها برخوردار است. برای مثال فیدرهای متشکل از بیمارستان ها، فرودگاه ها، مناطق حساس و مراکز پلیس از بارهای با اولویت به شمار می‌آیند. برای در نظر گرفتن اولویت بار در مطالعات بازیابی بار از طریق برنامه ریزی پویا، توان مصرفی بار در ضرایب اهمیت خود وزن‌دهی شده و تابع هدف وزن دهی شده مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$UE_{Rank} = \sum_{i=1}^{N} w_i \times P_i \times t_i \qquad (۸)$$

همچنین برای محاسبه پیکان (آرک) در مساله بازیابی اولویت دار بار نیز ضرایب وزن دهی اهمیت بار مطابق رابطه (۹) مورد لحاظ قرار می گیرد.

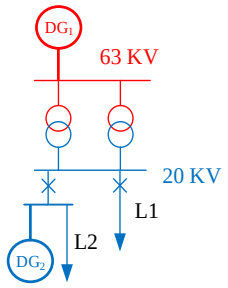
$$UE_Arc_{Rank} = [(\text{Total_Load}) - (\sum_{i=1}^{k-1} L_i)] \times w_i \times [t_k - t_{k-1}] \qquad (۹)$$

۳- مدلسازی منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده

در حالت کلی، منابع تولید و ذخیره انرژی می‌توانند در دو قسمت بالادست و پایین دست کلید فیدر توزیع قرار گیرند. شکل ۲ این دو حالت را نشان می‌دهد به طوری که منبع DG_1 در قسمت بالادست و منبع DG_2 در قسمت پایین دست قرار دارد.

۱-۳- منابع تولید پراکنده بالادست

منابع تولید بالادست این خاصیت را داشته که می‌توانند قبل از شروع و یا در حین فرایند کلیدزنی میزان توان تولید خود را در حالت آماده به کار تولید نمایند. ضمن این که توان تولیدی این منابع می‌توانند بین همه‌ی بارهایی شبکه مورد استفاده قرار گیرد. لذا از این لحاظ کاملا مشابه منابع تولید انتقال عمل کرده و توان تولیدی آن‌ها با توان تولیدی انتقال اضافه خواهد شد. به عبارت دیگر در محاسبات بازیابی بار، توان تولیدی آن‌ها با منابع بالادست در شبکه‌ی انتقال در هر لحظه از زمان جمع شده و منحنی تولیدی جدیدی را ایجاد می‌نمایند.



شکل (۲): طبقه بندی قرارگیری تولیدات پراکنده در شبکه توزیع

۲-۳- منابع تولید پراکنده پایین دست

برای مدلسازی این نوع منابع که در پایین دست فیدر پست فوق توزیع قرار دارند و در کنار آن‌ها یک بار نیز قرار خواهد داشت، می بایست پاسخ گویی بار را نیز در نظر گرفت. اهمیت این موضوع به دلیل قابل استفاده بودن و یا نبودن توان این منابع برای بار متناظر در آن فیدر، در هنگام بازیابی شبکه می‌باشد. به عبارت دیگر، آیا بار قرار گرفته در یک فیدر، قابلیت شکسته شدن بر روی منبع تولید پراکنده یا ذخیره انرژی پایین دست کلید را دارد و خیر؟ برای این کار می بایست میزان بار مصرفی فیدرها با میزان توان تولیدی منبع قرار گرفته در آن فیدر مقایسه شود. بر این اساس، می‌توان حالت مختلف بار و توان تولیدی قرار گرفته در یک فیدر را به شش حالت زیر بیان کرد. این شش حالت در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به حالات ذکر شده در بالا، می‌توان مدل مفهومی پیشنهاد شده در جدول (۲) همراه با اطلاعات مندرج در جدول (۱) را برای فیدرهای تولید و مصرف کننده بار با قابلیت و یا عدم قابلیت پاسخ گویی بار را برای مساله بازیابی بار استفاده کرد. در این مدل هر فیدر توسط سه عدد L، G و DR که به ترتیب میزان توان مصرفی، میزان توان تولیدی و قابلیت پاسخ‌گویی را نشان می‌دهند مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که DR می تواند مقدار صفر به معنای عدم قابلیت شکسته شدن بار فیدر و مقدار یک معرف توانایی DR در فیدر مورد نظر، می تواند داشته باشد.

جدول (۱): حالات مختلف تولیدات پراکنده و بار در فیدر آن

		قابلیت شکسته شدن بار L و یا توان تولیدی G	
		دارد	ندارد
مقایسه میزان توان تولیدی G و بار L	L>G	قسمتی از توان مورد نیاز بار توسط تولید تامین می‌شود.	امکان استفاده از تولید تا قبل از کلید زنی وجود ندارد.
	L=G	بار تامین شده و کیلدزنی در ابتدای بازیابی رخ خواهد داد.	غیر عملی
	L<G	بار تامین شده و مازاد تولید در حالت آماده به کار خواهد بود.	غیر عملی

هر یک از این حالات در ادامه به صورت جامع‌تری شرح داده شده‌اند.

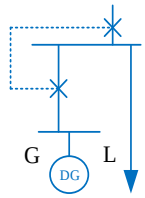
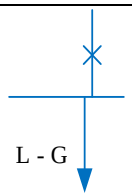
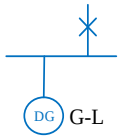
۱-۲-۳- حالت اول L<G:

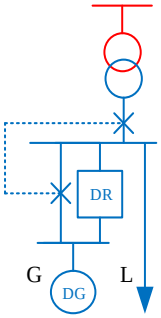
در این حالت میزان توان تولیدی تولیدات پراکنده از میزان توان مصرفی بار قرار گرفته در فیدر بیشتر است. از آنجایی که میزان توان تولید قابل تنظیم است، در نتیجه تنها حالتی که قابلیت عملی بودن را دارد که در آن میزان توان تولیدی به دو قسمت مصرفی بار فیدر و مازاد مصرف تقسیم می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

جدول (۲): شماتیک حالات مختلف تولیدات پراکنده و بار در فیدر آن

	قابلیت شکسته شدن بار L و یا توان تولیدی G	
	ندارد (DR=0)	دارد (DR=1)
L>G		
L=G	غیر عملی	
L<G	غیر عملی	



بنابراین میزانی از توان تولیدی برای بار داخل فیدر مورد استفاده قرار خواهد گرفت و مازاد تولید در حالت آماده به به کار قرار خواهد گرفت. لذا بدون اهمیت کلید خوردن بالادست می تواند بار فیدر خود را با رعایت قیود ولتاژ و فرکانس تامین نماید. این مازاد تولید نیز پس از کلیدزنی فیدر، برای استفاده در سایر بارهایی از شبکه که کلید موجود در فیدر آن‌ها وصل شده باشد، در اختیار آن‌ها قرار خواهد گرفت. در نتیجه به طور شهودی می‌توان این انتظار را داشت که برای حداقل کردن میزان انرژی تامین نشده در شبکه، زمان کلیدزنی این گونه بارها در زمان صفر (ابتدای فرایند بازیابی بار) بوده و مازاد توان تولیدی آن‌ها در همان ابتدا، به جهت تامین سایر بارهای شبکه، در اختیار کلیه منابع تولیدی بالادست شبکه قرار گیرد.

۳-۲-۲- حالت دوم L=G

در این حالت نیز به دلیل میزان تولید برابر با مصرف، منبع تولید پراکنده می تواند بار مصرفی خود را به طور کامل تامین کند. زمان کلید زنی چنین بارهایی در شبکه، از لحاظ میزان انرژی تامین نشده اهمیت نداشته و تاثیری بر روی مقدار آن نخواهد داشت. توصیه می‌شود بازیابی این بارها نیز مشابه حالت اول، به دلیل رعایت قیود محدودیت ولتاژ و فرکانس در ابتدای فرایند بازیابی انجام گرفته و به شبکه سراسری متصل گردد.

۳-۲-۳- حالت سوم L>G:

در اکثر مواقع، در شبکه‌های واقعی این حالت به وقوع می‌پیوندد. در این حالت میزان بار مصرفی موجود در فیدر، از توان تولیدی نامی تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی موجود در آن بیشتر می باشد. لذا می بایست امکان پاسخ‌گویی بار وجود دارد مورد بررسی قرار گیرد. پاسخ‌گویی بار به این معنی خواهد بود که آیا امکان شکسته شدن بار L فیدر به مقدار کوچکتر جهت تامین از طریق تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی وجود دارد یا خیر!؟ در صورتی که این امکان وجود داشته باشد، منبع تولید پراکنده موجود در فیدر به اندازه حداکثر توان نامی خود، بار مصرفی فیدر را تامین می‌کند. باقیمانده مصرف که توسط این منابع تامین نگردیده است، توسط منابع دیگر موجود در شبکه باید تامین گردد. لذا فقط مقدار تامین نشده‌ی بار با مقدار L-G در محاسبات میزان انرژی تامین نشده لحاظ خواهد شد و زمان بازیابی بر اساس این مقدار تعیین می‌شود. در صورتی که امکان شکسته شدن بار وجود نداشته باشد، نمی‌توان قبل از کلیدزنی فیدر، قسمتی از بار فیدر را توسط منابع فیدر تامین کرد. در نتیجه می بایست ابتدا کلید موجود در فیدر متصل شده، سپس توان نامی تولیدات موجود در فیدر توسط بار مصرف شده و باقیمانده مصرف نیز از طریق سایر منابع موجود در شبکه تامین شود.

۳-۳- محاسبه میزان انرژی تامین نشده با مدل پیشنهادی

معادلات همان‌طور که قبلا نیز بیان شد، برای محاسبه‌ی انرژی تامین نشده در حالتی که فیدر تنها شامل بار مصرفی می‌باشد، به صورت رابطه‌ی (UE_Arc) محاسبه می‌شود.

$$UE_Arc = [(\text{Total_Load}) - (\sum_{i=1}^{k-1} L_i)] \times [t_k - t_{k-1}] \qquad (۱۰)$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، میزان UE_Arc به مقداری از بار که در طی عبور از این پیکان تاکنون بازیابی نشده‌اند ($[(\text{Total_Load}) - (\sum_{i=1}^{k-1} L_i)]$) و اختلاف زمانی که برای عبور از این پیکان لازم است طی شود تا توان موجود در شبکه بالادست به اندازه کافی باشد ($[t_k - t_{k-1}]$) بستگی دارد. به عبارت دیگرمی‌توان گفت که میزان بار با نگاهی رو به جلو (بارهایی که بازیابی خواهند شد) و زمان مورد نیاز، با نگاهی رو به عقب (زمان بارهای بازیابی شده)، محاسبه می‌شود. لذا می‌توان رابطه‌ی UE_Arc را مطابق رابطه (۱۱) بیان کرد.

$$UE_Arc = \Delta L \times \Delta t \qquad (۱۱)$$

بنابراین، بر اساس دیدگاه مطرح شده، می‌توان محاسبه‌ی انرژی تامین نشده روی یک پیکان را برای هر یک از چهار حالت مدل پیشنهاد شده به صورت زیر بیان کرد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

۳-۴- محاسبه Δt

برای محاسبه‌ی زمان مورد نیاز برای رسیدن به یک حالت از گراف کلید زنی، باید میزان توان تولیدی در کل شبکه‌ی توزیع، قابلیت پشتیبانی از میزان بار مصرفی در کل شبکه توزیع را داشته باشد. مقدار کل بار مصرفی شبکه در آن حالت، مجموع بار موجود در همه‌ی فیدرهایی خواهد بود که تا آن زمان کلید زنی شده‌اند. توان تولیدی نیز می‌تواند ناشی از توان تولیدی شبکه‌ی انتقال، توان منابع تولید پراکنده بالادست و یا توان تولیدات پراکنده‌ی یا منابع ذخیره انرژی پایین دستی باشد که فیدر آن‌ها متصل شده است، باشد. در نتیجه مقدار توان تولیدی نیز مجموع سه نوع توان ذکر شده می‌باشد. می‌توان رابطه‌ی زمان را مطابق رابطه (۱۲) بیان کرد.

$$t_k = \min\left\{ t \;\middle|\; G_{up.trans}(t) + G_{up.dist}(t) \geq \sum_{i=1}^{k}(L_i - G_i) \right\} \quad (۱۲)$$

در این رابطه $G_{up.trans}(t)$ توان تولیدی ناشی از شبکه انتقال در لحظه t، $G_{up.dist}(t)$ توان تولیدی بالادست ناشی از منابع تولید موجود در شبکه توزیع و $\sum_{i=1}^{k}(L_i - G_i)$ میزان خالص توان مصرفی فیدرهایی است که کلید خورده‌اند. به عبارت دیگر، زمان یک حالت، زمانی خواهد بود که توان تولیدی انتقال، میزان باقیمانده مصرف در بارهای کلید خورده را تامین می‌نماید. نکته قابل تذکر در این رابطه این است که در صورتی که بار کلید خورده در مرحله $k^{ام}$، در یکی از حالات $L=G$ و یا $G>L$ قرار داشته باشد، مقدار $t_k = t_{k-1}$ خواهد بود. در نتیجه $\Delta t = t_k - t_{k-1} = 0$ و $UE_Arc = \Delta L \times \Delta t = 0$ خواهند شد.

۳-۵- محاسبه ΔL

مقدار ΔL مجموع باری از دید شبکه خواهد بود که در ادامه فرایند بازیابی بار باید بازیابی شوند. از دید شبکه بدین معنا خواهد بود که برای بارهایی که L=G و یا L<G باشد این مقدار برابر صفر، و برای بارهایی که L>G با قابلیت پاسخ‌دهی بار برابر L-G و در حالت بدون قابلیت پاسخ‌دهی بار (DR=0) برابر L می‌باشد. می‌توان برای محاسبه ΔL از رابطه‌ی (۱۳) استفاده کرد.

$$\Delta L = \sum_{i=k}^{L}\left[L_i - DR_i \times G_i\right]^+ \quad (۱۳)$$

علامت $[\;]^+$ در این رابطه به معنای $[x]^+ = \max\{0, x\}$ می‌باشد. انتخاب این عملگر، به این دلیل است تا برای بارهای $L_i < G_i, DR_i = 1$ که مقدار $L_i - DR_i \times G_i < 0$ منفی می‌شود، این مقدار برابر صفر گردد. برای مقدار $L_i = G_i, DR_i = 1$ نیز، مقدار خروجی $L_i - G_i \times DR_i = 0$ را ایجاد خواهد کرد. به همین ترتیب برای بارهایی که $L_i > G_i, DR_i = 1$ مقدار $L_i - G_i$ و برای بارهایی که $L_i > G_i, DR_i = 0$ مقدار L_i ایجاد می‌شود.

به طور خلاصه، الگوریتم پیشنهادی بازیابی بار با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی و توپولوژی آن در شبکه توزیع به صورت گام به گام را می‌توان در شکل ۴ نشان داد.

مساله مهم دیگر جهت مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در حل مساله بازیابی بار شبکه توزیع علاوه بر جواب بهینه و ترتیب برق دار کردن فیدرهای شبکه، زمان مناسب اجرای آن برای استخراج نتایج برای اپراتور و تصمیم گیران بهره برداری شبکه است. محدوده زمان مجاز برای این مساله Operational Real Time می باشد که بین چند دقیقه تا کمتر از یک ساعت قرار دارد [۴ و ۵].

۴- نتایج عددی

در این بخش ۲ حالت مختلف شبیه سازی و آنالیز می شود. بازیابی بار شبکه تست (حالت پایه) در نظر گرفتن اولویت بار در کیس ۱ قرار می‌گیرد. در کیس ۲ شبکه تست اصلاح شده (حالت اصلاح شده) با در نظر گرفتن منابع ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده توام با در نظر گرفتن اولویت بار شبیه سازی خواهد شد.

۴-۱- حالت اول (حالت پایه)

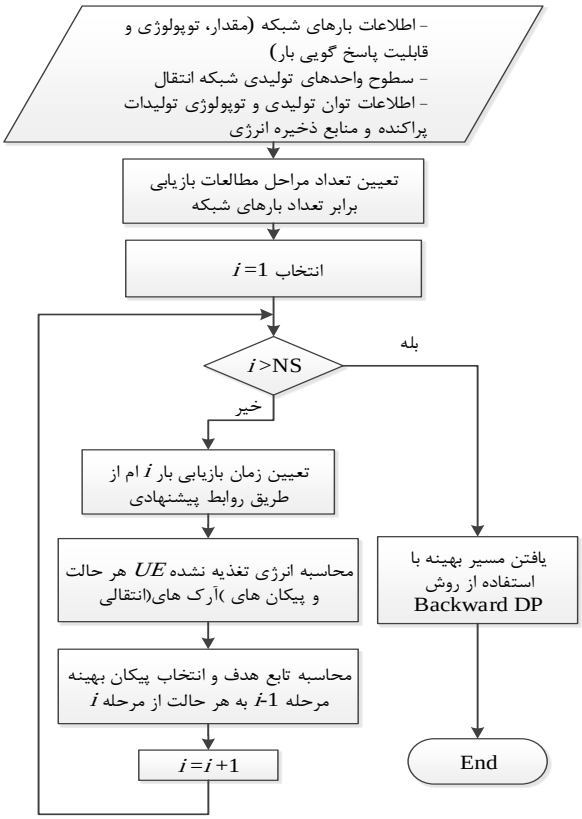
برای شبیه سازی و نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، از شبکه فوق توزیع زنجان متشکل از ۱۶ فیدر استفاده شده است. نمودار تک خطی این شبکه در شکل ۷ نشان داده شده است. در این حالت شبکه تست بدون احتساب تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی متصل به آن است. در این شبکه، ۱۶ بریکر برای بازیابی ۱۶ بار مصرفی متصل به هر انشعاب وجود دارد. مشخصات متوسط بار تخمین زده شده شبکه تست زنجان به همراه اولویت بارهای آن در جدول ۲ آمده است. همچنین ضرایب اولویت بار نیز مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

در این مطالعات اطلاعات توان تولیدی واحد های تولیدی انتقال برای فرآیند بازیابی شبکه توزیع معلوم فرض شده است. اطلاعات توان تولیدی انتقال بر حسب زمان متناظر آن در جدول ۴ نشان داده شده است. در این حالت جواب بهینه در برنامه ریزی پویا دارای تابع هدف ۷۴,۷۸۳۳ مگاوات ساعت انرژی تامین نشده است. زمان اجرای این شبیه سازی ۲۹,۰۵ ثانیه به طول انجامید. برای مقایسه بهتر و اهمیت جواب بهینه در مساله بازیابی بار شبکه، یک جواب تصادفی نیز در نظر گرفته شده است که ترتیب کلید زنی آن در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود میزان تابع هدف انرژی تامین نشده در این کیس ۸۰,۵۳۵ مگاوات ساعت است که از جواب بهینه به میزان ۵,۷۵ مگاوات بیشتر است،که مقدار قابل ملاحظه ای برای سیستم می باشد. همچنین روش کلیدزنی بارهای کوچک به بزرگ و بزرگ به کوچک نیز در شبکه تست برای مقایسه بهتر مورد مطالعه قرار گرفته و با توجه به نتایج بدست آمده هر دو روش برای بازیابی بار روش قابل اعتمادی نبوده و این از میزان انرژی تامین نشده بالای آن نسبت به جواب بهینه قابل استنتاج است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

در این شبیه سازی اثر اولویت بار نیز در شبیه سازی جداگانه ای با تابع هدف وزن دهی شده با ضرایب وزنی اولویت بار مورد ارزیابی قرار گرفت که جواب بهینه در سطر دوم جدول ۵ نشان داده شده است. در این حالت جواب Weighted UE کمینه ترین حالت ممکن از فضای جواب می باشد که همانطور که مشاهده می شود اولویت بار بر ترتیب کلیدزنی جواب بهینه تاثیر گذاشته است. برای مثال بار F2 که اولویت ۱ در میان بارهای شبکه تست است ابتدا برق دار شده و بعد از آن به بارهای ۳، ۱۲ که اولویت ۲ دارند در اولویت جواب بهینه قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که تفاوت در نظرگیری اولویت بار با بدون آن ۱،۰۲ مگاوات بوده که در جدول ۵ مشهود است.



شکل ۳: الگوریتم بازیابی شبکه توزیع بر پایه برنامه ریزی پویا

جدول (۳): ضرایب وزنی بارهای شبکه تست

Rank	Weighted Factor
1	2.5
2	2
3	1.5
4	1

جدول (۲): توان حقیقی شبکه تست زنجان با در نظر گرفتن اولویت بار

فیدر	توان مصرفی (MW)	Rank	فیدر	توان مصرفی (MW)	Rank
L1	21	4	L9	22.5	2
L2	22.3	1	L10	19.2	4
L3	6.4	2	L11	11.6	3
L4	6.5	4	L12	20.5	2
L5	6.6	3	L13	33	4
L6	15.4	2	L14	14.2	3
L7	15.5	4	L15	8.2	2
L8	19.5	3	L16	12	4

جدول (۴): توان تولیدی انتقال بر حسب زمان در دسترس آن

Time (min)	Total Generation(MW)
0	0
5	12
8	16.5
15	24
20	35
28	50
35	85
40	107
51	129
68	154
85	188
111	205
140	237
169	250
205	280

۴-۲- حالت دوم (حالت اصلاح شده)

در این کیس، از شبکه تست اصلاح شده زنجان استفاده شده است که در آن علاوه بر در نظر گرفتن اولویت بار، تاثیر تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی شبکه توزیع در مطالعات بازیابی بار در نظرگرفته شده است. نمودار تک خطی این شبکه در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شبکه، DG3 معرف منابع ذخیره انرژی (خودروهای برقی) در شبکه فشار ضعیف (پایین دست) می باشد. همچنین DG1 منبع تولید پراکنده در قسمت بالادست و DG2 و DG4 منابع با ابعاد کوچکتر در پایین دست پست فوق توزیع در نظر گرفته شده اند. لازم به ذکر است که برای DG1 و DG4 قابلیت DR و شکسته شدن بارهای فیدر وجود داشته در حالی که برای DG2 و DG3 این قابلیت برای شبیه سازی در نظر گرفته نشده است. اطلاعات تولیدات پراکنده و منابع ذخیره در جدول ۶ آمده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

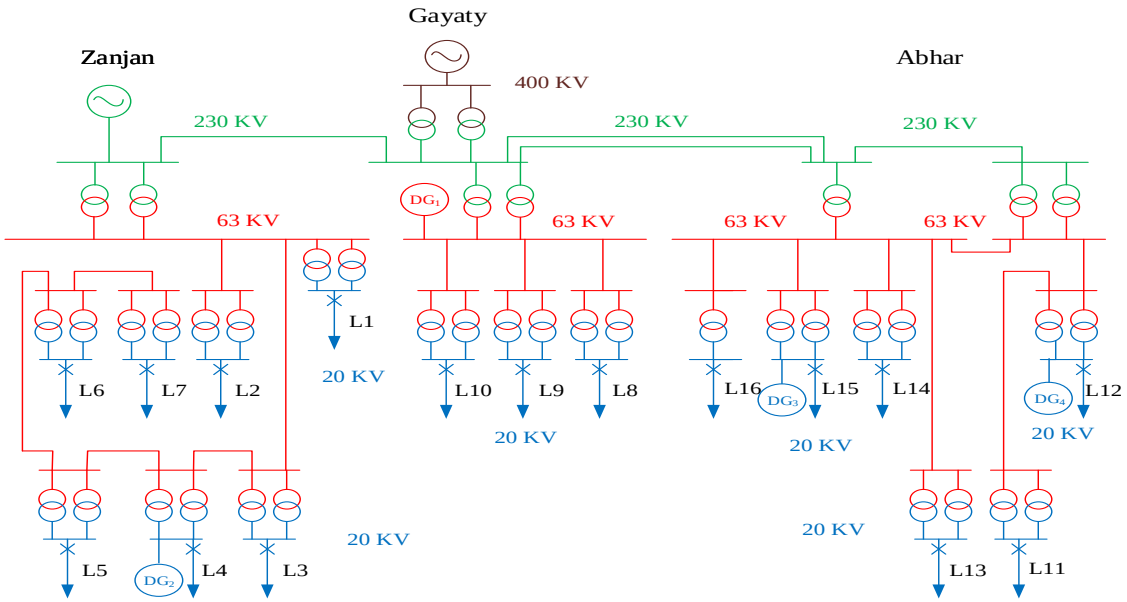
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

جدول (۵): انرژی تامین نشده مطالعات DP از روش های مختلف برای حالت اول (حالت پایه)

Solution Methods	UE (MWh)	Weighted UE	Switch Sequence Solution (Feeder No.)															
Full DP	74.7833	111.672	F9	F3	F1	F14	F7	F12	F8	F6	F13	F4	F15	F2	F16	F11	F10	F5
Proposed Full DP (Rank)	75.7950	95.278	F2	F3	F12	F15	F9	F8	F6	F11	F5	F16	F14	F7	F1	F13	F10	F4
Random restoration	80.5350	128.070	F11	F1	F12	F16	F14	F10	F8	F2	F3	F4	F7	F15	F13	F5	F9	F6
Restore small feeders first	80.8867	123.477	F3	F4	F5	F15	F11	F16	F14	F6	F7	F10	F8	F12	F1	F2	F9	F13
Restore large feeders first	77.4700	115.876	F13	F9	F2	F1	F12	F8	F10	F7	F6	F14	F16	F11	F15	F5	F4	F3

جدول (۷): انرژی تامین نشده مطالعات DP از روش‌های مختلف برای حالت دوم (حالت اصلاح شده)

Solution Methods	UE (MWh)	Weighted UE	Switch Sequence Solution (Feeder No.)															
Full DP-1	61.7273	88.2386	F15	F12	F13	F5	F4	F8	F3	F2	F6	F9	F11	F1	F7	F10	F14	F16
Full DP-1 (Rank)	62.6180	78.5127	F15	F12	F2	F6	F9	F3	F5	F8	F11	F4	F14	F16	F13	F7	F10	F1
Random restoration	64.1714	99.3502	F11	F1	F12	F16	F14	F10	F8	F2	F3	F4	F7	F15	F13	F5	F9	F6
Restore small feeders first	66.3870	99.7213	F3	F4	F5	F15	F11	F16	F14	F6	F7	F10	F8	F12	F1	F2	F9	F13
Restore large feeders first	65.4679	96.5789	F13	F9	F2	F1	F12	F8	F10	F7	F6	F14	F16	F11	F15	F5	F4	F3



شکل (۴): نمودار تک خطی شبکه زنجان به عنوان شبکه تست مورد مطالعه

جدول (۶): توان تولیدی منابع ذخیره انرژی و DG در شبکه تست اصلاح شده

DG No.	Installed feeder	Demand Response	Load	Generation (MW)
DG1	Upper side	1	-	10
DG2	F4	0	6.5	1
DG3	F15	1	8.2	10
DG4	F12	0	20.5	10

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می شود فیدر ۱۵ که DG3 در آن با قابلیت دیماندریسپانس قرار دارد در اولویت اول کلیدزنی جواب بهینه قرار گرفته است. دلیل این امر این است که توان تولیدی در این فیدر از بار آن بیشتر بوده لذا وصل این فیدر به معنای افزایش توان تولیدی شبکه به اندازه ۱٫۸ مگاوات می باشد که طبیعی است که می بایست در اولویت برق دار شدن در بازیابی بار قرار گیرد. فیدر بعدی که در جواب بهینه بازیابی قرار می گیرد فیدر ۱۲ است که در این فیدر DG4 با ۱۰ مگاوات توان بدون قابلیت DR وجود دارد. از آنجا که تا وقتی که این فیدر برق دار نشود توان DG قابل تزریق به شبکه نمی باشد لذا در مساله بازیابی در اولویت بعدی جواب بهینه قرار گرفته است. چرا که با بسته شدن کلید این فیدر به میزان ۱۰ مگاوات بدون احتساب توان تولیدی در دسترس انتقال از میزان انرژی تامین نشده سیستم می کاهد. همین امر برای منابع ذخیره انرژی DG2 نیز صادق است اما به دلیل توان تولیدی نه چندان بالای آن در اولویت پنجم ترتیب کلیدزنی جواب بهینه قرار گرفته است.

نکته قابل توجه در حالت شبیه سازی با در نظر گرفتن اولویت بار، برق دار شدن مجدد فیدرهای ۱۵ و ۱۲ است که با وجود اولویت ۲ بارهای این فیدرها، به دلیل تزریق توان و کاهش انرژی تامین نشده سیستم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]

در صورت برق دار شدن آن ها در اولویت ترتیب کلیدزنی بازیابی بار قرار گرفته اند. بعد از آن بار L2 است که بالاترین ضریب وزنی اولویت بار را دارا می باشد.

این نکته نیز شایان ذکر است که جهت مقایسه عملکرد و عملی بودن روش پیشنهادی زمان شبیه سازی و یافتن جواب بهینه در مطالعات نمونه انجام گرفته است و در تمامی موارد و حالات بیان شده کمتر از یک دقیقه اجرا شده است. لذا با توجه به مطالب بیان شده در بخش های پیشین که محدوده مجاز زمان عملکرد در این مطالعات Operational Real Time می باشد [۴ و ۵] لذا عملکرد روش پیشنهادی مطلوب می باشد.

۵- نتیجه گیری

دراین مقاله یک روش نوین برای بازیابی بار در شبکه توزیع الکتریکی در حضور تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی ارائه شده است. در این مساله، تاثیر امکان استفاده از پاسخ گویی بار، یا به عبارتی امکان شکسته شدن بار جهت تامین بارهایی که در آن تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی موجود است نیز در نظر گرفته شده است. انرژی تامین نشده سیستم به عنوان تابع هدف مساله بهینه سازی برنامه بازیابی بار مفروض گردید و از برنامه ریزی پویا (DP) به عنوان ابزار بهینه سازی آن استفاده شد. همچنین تاثیر اولویت بار شبکه را نیز در نظر می گیرد. در نهایت چارچوب پیشنهادی در یک شبکه تست واقعی پیاده سازی گردید و نتایج به دست آمده حاکی از کارآمد و عملی بودن بازیابی بار شبکه توزیع در حضور تولیدات پراکنده و منابع ذخیره انرژی می باشد.

مراجع

[۱] A. S. Bretas, and A. G. Phadke, "Artificial neural networks in power system restoration," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1181-1186, 2003.

[۲] W.-H. Chen, M.-S. Tsai, and H.-L. Kuo, "Distribution system restoration using the hybrid fuzzy-grey method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 199-205, 2005.

[۳] J. Salehi, and M. R. Haghifam, "Determining the optimal reserve capacity margin of Sub-Transmission (ST) substations using Genetic Algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 492-503, 2014.

[٤] R. Pérez-Guerrero, G. T. Heydt, N. J. Jack, B. K. Keel, and A. R. Castelhano, "Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1589-1596, 2008.

[٥] R. E. Pérez-Guerrero, and G. T. Heydt, "Distribution system restoration via subgradient-based lagrangian relaxation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1162-1169, 2008.

[٦] S. Alvisi, and M. Franchini, "A Linearization Approach for Improving the Computational Efficiency of Water Distribution System Ranking-based Optimization Algorithms," *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 516-525, 2015.

[٧] A. G. Boulanger, A. C. Chu, S. Maxx and D. L. Waltz, "Vehicle Electrification: Status and Issues," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1116-1138, 2011.

[٨] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leão, M. J. Rider, and E. S. de Souza, "A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 2, pp. 1259-1268, 2016.

[٩] E. L. Karfopoulos and N. D. Hatziargyriou, "A Multi-Agent System for Controlled Charging of a Large Population of Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1196-1204, 2013.

[١٠] M. A. Ortega-Vazquez, F. Bouffard and V. Silva, "Electric Vehicle Aggregator/System Operator Coordination for Charging Scheduling and Services Procurement," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1806-1815, 2013.

[١١] C. Ucak, and A. Pahwa, "An analytical approach for step-by-step restoration of distribution systems following extended outages," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1717-1723, 1994.

[١٢] X. Huang, and G. Taylor, "Multi-period service restoration of distribution systems incorporating interruptible load," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 1788-1803, 2015.

[١٣] S. Riahinia, A. abbaspour, H. Farzin and S. Khalili, "A Dynamic Programming-Based Framework for Distribution System Restoration Considering Load Uncertainties " *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Oct, 2017.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-09]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.11.0]