

یک برنامه ریزی مقاوم تاب آور محور برای توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند الکتریکی در حضور سیستم های ذخیره کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار

A Resilient Based Resistant Planning for Economical Distribution of Electric Smart Distribution Network in the Presence of Electric Storage Systems and Load Responsive Schedule

چکیده

چالش های نفوذ گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر و مشارکت برنامه پاسخگویی بار در تأمین بهینه بارهای الکتریکی به عنوان مسائل اصلی شبکه های توزیع هوشمند برق آینده به حساب می آید. براین اساس، توسعه رویکردهای عملی برای مقابله با رفتارهای نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر و ارتقای تاب آوری کل سیستم توزیع الکتریکی توسط منابع انعطاف پذیر انرژی ضروری به نظر می رسد. این مقاله یک رویکرد بهینه سازی مقاوم برای توزیع اقتصادی^۱ یک شبکه توزیع الکتریکی هوشمند در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و باهدف کاهش کل هزینه های بهره برداری و بهبود تاب آوری توسط منابع انعطاف پذیر انرژی مثل سیستم های ذخیره کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار پیشنهاد می کند. در مطالعه پیشنهادی تأثیر حضور سیستم ذخیره کننده الکتریکی بر روی مدیریت رفتار نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر در شرایط عادی و رویدادهای با احتمال کم و تأثیر زیاد مورد مطالعه قرار می گیرد. علاوه بر این مزایای اجرای برنامه پاسخگویی بار در مدل توزیع اقتصادی شبکه توزیع برق باهدف کاهش کل هزینه های عملیاتی و کاهش بارهای قطع شده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در رویکرد پیشنهادی برای مدل سازی رفتار غیرقطعی منابع انرژی تجدیدپذیر در مدل توزیع اقتصادی شبکه توزیع برق هوشمند از روش بهینه سازی مقاوم استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از یک سیستم تست استاندارد ۳۳ شینه برای مدل سازی شبکه توزیع برق هوشمند استفاده شده است. مسئله پیشنهادی در قالب یک برنامه ریزی غیرخطی آمیخته شده با اعداد صحیح مدل سازی گردیده و در محیط نرم افزار GAMS شبیه سازی می گردد و تحت حل کننده قدرتمند CPLEX حل شده است. حل مسئله پیشنهادی منجر به ارائه یک راه حل بهینه می گردد که برنامه ریزی بهینه شبکه توزیع برق هوشمند را در مقابل رفتارهای نوسانی نامطلوب منابع انرژی تجدیدپذیر مقاوم می سازد. علاوه بر این، نتایج شبیه سازی ها اثربخشی رویکرد پیشنهادی را در کاهش بارهای قطعی برای مصرف کنندگان شبکه توزیع تأیید می کند.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع هوشمند الکتریکی، تاب آوری، سیستم های ذخیره کننده الکتریکی، برنامه پاسخگویی بار، بهینه سازی مقاوم نوع مقاله: پژوهشی

پارسا پرهیزگار^{۱*}، پریسا پرهیزگار^۲

۱. دانشجوی ارشد مهندسی برق، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی برق، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
ایمیل نویسنده گان و عهده دار مکاتبات:

parsa001100par@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱-۰۹-۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۱۲-۰۳

مقدمه

منابع تولید پراکنده در مرجع [۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. در رویکرد پیشنهادی از روش بهینه سازی تصادفی برای مدلسازی رفتار غیر قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. در مطالعه [۴] یک برنامه ریزی غیر خطی آمیخته شده با اعداد صحیح برای تعیین اندازه و مکان بهینه سیستم‌های فتوولتایک در شبکه توزیع برق مورد بررسی قرار گرفته است. یک برنامه ریزی توسعه برای بررسی رفتار منابع تولید پراکنده بر روی تغییرات ولتاژ و تلفات شبکه توزیع برق در [۵] ارائه شده است. در این مطالعه از روش پسر و پیشرو برای مدلسازی شارش توان در شبکه توزیع برق استفاده شده است. در [۶] یک رویکرد مبتنی بر نظریه تصمیم گیری شکاف اطلاعاتی^۱ (IGDT) برای تعیین اندازه و مکان بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع برق قابل بازآرایی با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی و آلاینده‌گی مورد بحث قرار گرفته است. یک برنامه ریزی مقاوم برای مدیریت بهینه شبکه توزیع برق در حضور منابع تجدیدپذیر انرژی و سیستم‌های ذخیره کننده انرژی با هدف حداکثر کردن سود شرکت توزیع برق در [۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال در هیچ یک موارد مطالعاتی فوق کاربرد منابع انعطاف پذیر انرژی تحت شرایط رویدادهای با احتمال کم و تاثیر زیاد در شبکه‌های توزیع برق مورد مطالعه قرار نگرفته است.

از این رو برخی دیگر از پژوهش‌های موجود بر روی ارتقای تاب آوری شبکه‌های توزیع برق در حضور منابع انعطاف پذیر انرژی تمرکز دارد. در [۸] یک مسئله بهینه سازی دو مرحله ای برای بهبود تاب آوری شبکه‌های توزیع برق در حضور سیستم‌های ذخیره کننده سیار و با هدف کاهش بارهای قطع شده ارائه شده است. یک برنامه ریزی خطی آمیخته شده با اعداد صحیح مبتنی بر بهینه سازی تصادفی برای ارتقای تاب آوری شبکه‌های توزیع برق قابل بازآرایی در حضور سیستم‌های تولید کننده و ذخیره کننده سیار در [۹]

ارتقای سیستم‌های قدرت به سمت شبکه‌های هوشمند منجر به افزایش قابلیت اطمینان و تسهیل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر شده است [۱]. با این حال، رفتار نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر چالش‌های جدیدی را در مدیریت و بهره برداری بهینه سیستم‌های توزیع هوشمند ایجاد کرده است. بدین ترتیب اهمیت ارتقای انعطاف‌پذیری کل سیستم توزیع برق بیش از پیش افزایش یافته است. در این میان، سیستم‌های ذخیره کننده الکتریکی می‌تواند گزینه‌ای بسیار مناسب برای ارتقای انعطاف‌پذیری کل سیستم‌های توزیع هوشمند باشد [۲]. علاوه بر این، سیستم‌های ذخیره کننده الکتریکی با ردیابی قیمت بازار برق می‌تواند انرژی الکتریکی را در ساعت‌های ارزان قیمت خریداری کرده و در ساعت‌های گران قیمت به فروش برساند و منجر به افزایش سود شرکت توزیع برق بشود. یکی دیگر از راه‌حل‌های بسیار مناسب برای مدیریت رفتار غیر قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر، اجرایی برنامه‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع برق می‌باشد. اجرایی برنامه پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع برق منجر به جای مصرف توان الکتریکی از ساعت‌های پیک و گران قیمت به ساعت‌های غیر پیک و ارزان قیمت می‌شود. از این رو، برنامه پاسخگویی می‌تواند بار به عنوان یک راه‌حل مناسب برای کاهش هزینه‌های عملیاتی در شبکه‌های توزیع هوشمند اجرا شود.

پیشینه تحقیق

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی اثرات منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع هوشمند برق انجام گرفته است. یک برنامه ریزی دو سطحی برای مشارکت شبکه توزیع برق در بازار عمده فروشی برق با در نظر گرفتن اثرات

1. Information gap decision theory

B. فرمول بندی ریاضی

۱. تابع هدف مسئله

معادله (۱) بیان کننده تابع هدف مسئله است. تابع هدف مسئله شامل هفت ترم می باشد که ترم اول و دوم به ترتیب هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه بالادستی و هزینه های عملیاتی DGها می باشد. همچنین ترم های سوم و چهارم به ترتیب نشان دهنده هزینه توان تولیدی توربین های بادی و سیستم های فتوولتایک است. هزینه بارهای قابل قطع و بارهای قابل شیفت نیز توسط ترم های پنجم و ششم توصیف می شود. ترم هفتم نیز بیان کننده هزینه شارژ و دشارژ باتری ها در شبکه توزیع برق است.

$$\min \sum_t \left\{ C_t^m P_t^m + \sum_{g \in CU} (a_g^{DG} (P_{g,t}^{DG})^2 + b_g^{DG} P_{g,t}^{DG} + c_g^{DG}) + \sum_v C_v^{WT} P_{v,t}^{WT} \right. \\ \left. + \sum_v C_v^{PV} P_{v,t}^{PV} + \sum_c C_c^L P_{c,t}^L + \sum_g C_g^{DR} P_{g,t}^{DR} + \sum_b (P_{b,t}^C + P_{b,t}^D) C_b^{ESS} \right\} \quad (1)$$

۲. محدودیت منابع تولید پراکنده

محدودیت حداکثر توان تولیدی DGها توسط معادله (۲) مدل می شود. معادلات (۳) - (۴) نیز بیان کننده محدودیت های حداکثر شیب افزایشی و کاهش می هر یک از DGها است.

$$0 \leq P_{g,t}^{DG} \leq \overline{P_g^{DG}}, \forall g, \forall t \quad (2)$$

$$P_{g,t}^{DG} - P_{g,t-1}^{DG} \leq R_g^{UP}, \forall g, \forall t \quad (3)$$

$$P_{g,t-1}^{DG} - P_{g,t}^{DG} \leq R_g^{LP}, \forall g, \forall t \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{g,t}^{DG} \leq \overline{Q_g^{DG}}, \forall g, \forall t \quad (2)$$

$$Q_{g,t}^{DG} - Q_{g,t-1}^{DG} \leq R_g^{UP}, \forall g, \forall t \quad (3)$$

$$Q_{g,t-1}^{DG} - Q_{g,t}^{DG} \leq R_g^{LP}, \forall g, \forall t \quad (4)$$

ارائه شده است. در [۱۰] یک رویکرد بهینه سازی برای ارتقای تاب آوری شبکه های توزیع برق به کمک ریزشکده ها با هدف حداکثر رساندن تامین بارهای بحرانی پیشنهاد شده است. یک برنامه ریزی دو مرحله ای خطی آمیخته شده با اعداد صحیح برای ارتقای تاب آوری شبکه های توزیع هوشمند با اهداف حداکثر رساندن تامین بارهای بحرانی و کمینه کردن هزینه های عملیاتی در [۱۱] پیشنهاد شده است. مکان یابی بهینه منابع تولید انرژی در مرحله اول و ارزیابی تاب آوری شبکه های توزیع برق در مرحله دوم این مطالعه انجام شده است. در مطالعه [۱۲] یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق برای ارتقای بلند مدت تاب آوری شبکه های توزیع برق تحت رویکرد بهینه سازی تصادفی پیشنهاد شده است.

با این حال در هیچ یک از مطالعات فوق یک توزیع اقتصادی تاب آور محور برای شبکه توزیع هوشمند برق در حضور منابع انعطاف پذیر انرژی و با در نظر گرفتن نفوذ گسترده منابع انرژی تجدید پذیر پیشنهاد نشده است. برای پوشش شکاف مطالعات پیشین و جدول ۱ سهم اصلی این مقاله به شرح زیر است:

۱. یک مدل جدید توزیع اقتصادی مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای ارتقای تاب آوری و کمینه کردن هزینه های عملیاتی شبکه توزیع هوشمند برق تحت نفوذ گسترده منابع انرژی تجدید پذیر پیشنهاد شده است.

۲. اثرات به کارگیری سیستم های ذخیره کننده انرژی با اهداف مدیریت رفتار غیر قطعی منابع انرژی تجدید پذیر، کاهش هزینه های عملیاتی، افزایش انعطاف پذیری و تاب آوری شبکه های توزیع هوشمند برق مطالعه شده است.

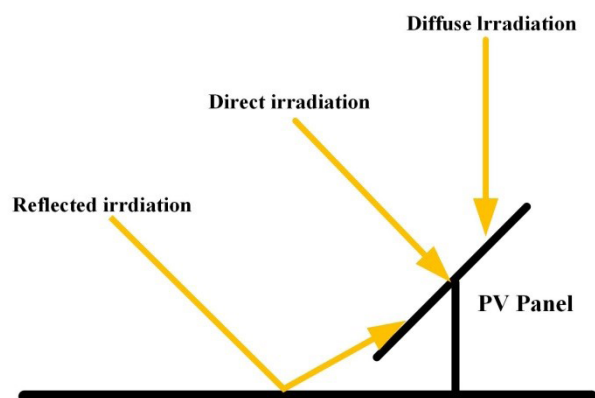
۳. یک مطالعه ای بر روی مزایای اجرای برنامه پاسخگویی بار در شبکه های توزیع هوشمند الکتریکی با اهداف کاهش بارهای قطع شده و کمینه کردن هزینه های عملیاتی انجام شده است.

جدول ۱: مقایسه رویکرد پیشنهادی با مطالعات پیشین

مرجع	شبکه توزیع برق	سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی	برنامه پاسخگویی بار	منابع انرژی تجدیدپذیر	تاب آوری	عدم قطعیت
[3]	✓	✗	✗	✓	✗	بهینه‌سازی تصادفی
[4]	✓	✗	✗	✓	✗	✗
[5]	✓	✗	✗	✓	✗	✗
[6]	✓	✗	✗	✓	✗	IGDT
[7]	✓	✓	✓	✓	✗	بهینه‌سازی مقاوم
[8]	✓	✓	✗	✓	✓	✗
[9]	✓	✓	✓	✗	✓	✗
[10]	✓	✗	✗	✗	✓	✗
[11]	✓	✗	✗	✓	✓	✗
[12]	✓	✗	✗	✓	✓	✗
مطالعه حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	بهینه‌سازی مقاوم

۳. سی‌ام‌های فتوولتائیک:

باتوجه به رابطه (۴) توان خروجی سیستم‌های فتوولتائیک وابسته به سلول‌های سری و موازی، دمای سلول و تشعشع خورشید است. رابطه (۵) بیان‌کننده دمای سلول می‌باشد که این دما وابسته به دمای محیط و تشعشع خورشید است. تشعشع خورشید بر روی سطح PV از رابطه (۶) به دست آمده که این تشعشع شامل: تشعشع افقی پراکنده^۱ (DHI)، تشعشع مستقیم^۲ (DNI) و تشعشع افقی کلی^۳ (GHI) خورشید است. در طرح ۱، این سه تشعشع همراه با تشعشع منعکس شده^۴ (RI) نشان داده شده است [۲].



طرح ۱: نحوه تشعشعات در PV ارائه شده

۴. محدودیت توان تولیدی توربین بادی

توان قابل دسترس توربین بادی وابستگی کاملی به جریان ورودی سرعت باد دارد که توسط معادله (۵) مدل‌سازی می‌شود. محدودیت حداکثر توان تولیدی باد نیز توسط معادله (۶) مدل‌سازی می‌شود.

$$\overline{P_t^{PV}} = P_{STC}^{PV} N_S^{PV} N_P^{PV} \frac{I_{t,\varepsilon}}{1000} (1 - \alpha(T_t^C - 25)) \quad \forall t \quad (5)$$

$$T_t^C = T_t^A + \frac{I_t}{800} (NOCT - 20) \quad \forall t \quad (6)$$

$$I_t = I_t^d \cos \gamma + I_t^{diff} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho I_{t,\varepsilon} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \forall t \quad (7)$$

$$0 \leq P_{v,t}^{PV} \leq \overline{P_t^{PV}} \quad \forall t \quad (8)$$

1. Diffuse Horizontal Irradiance

2. Direct Normal Irradiance

3. Global Horizontal Irradiance

4. Reflected Irradiance

شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی می‌باشد. نهایتاً محدودیت (۱۹) برابری مقدار نهایی و مقدار اولیه سیستم ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی را تضمین می‌کند.

$$SOC_{b,t} = SOC_{b,t-1} + P_{b,t}^C \eta_b^C - \frac{P_{b,t}^D}{\eta_b^D} \quad \forall b, \forall t \quad (15)$$

$$\underline{SOC}_b \leq SOC_{b,t} \leq \overline{SOC}_b \quad \forall b, \forall t \quad (16)$$

$$0 \leq P_{b,t}^C \leq \overline{P}_b^C \quad \forall b, \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{b,t}^D \leq \overline{P}_b^D \quad \forall b, \forall t \quad (18)$$

$$SOC_{b,ini,s} = SOC_{b,fin,s} \quad (19)$$

۷. معادلات پخش بار و تعادل توان در شبکه توزیع

برق

معادلات (۱۵) و (۱۶) به ترتیب مدل‌کننده شارش توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع برق می‌باشد. محدودیت ولتاژ گرہ‌ها در شبکه توزیع برق نیز از طریق معادله (۱۷) بیان می‌شود. ظرفیت توان اکتیو و راکتیو قابل انتقال از فیدرهای شبکه توزیع برق از طریق معادلات (۱۸) - (۲۰) بیان می‌شود. معادلات (۲۱) - (۲۲) نیز بیان‌کننده محدودیت توان‌های خریداری شده از شبکه بالادستی می‌باشد. معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع برق نیز توسط (۲۳) - (۲۴) بیان می‌شود.

$$P_{i,j,t}^{flow} = V_{i,t}^2 G_{i,j} - V_{i,t} V_{j,t} Y_{i,j} \cos(\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (15)$$

$$Q_{i,j,t}^{flow} = V_{i,t}^2 Y_{i,j} - V_{i,t} V_{j,t} G_{i,j} \sin(\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (16)$$

$$\underline{V}_i \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_i \quad (17)$$

$$-\overline{P}_{i,j}^{flow} \leq P_{i,j,t}^{flow} \leq \overline{P}_{i,j}^{flow} \quad (18)$$

$$-\overline{Q}_{i,j}^{flow} \leq Q_{i,j,t}^{flow} \leq \overline{Q}_{i,j}^{flow} \quad (19)$$

$$P_i^{WT} = \begin{cases} P_r \frac{(S_i - S_{ci})}{(S_r - S_{ci})} & S_{ci} \leq S_i \leq S_r \\ P_r & S_r \leq S_i \leq S_{co} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{w,t}^{WT} \leq \overline{P}_t^{WT} \quad \forall t, \forall w \quad (6)$$

۵. مدل‌سازی برنامه پاسخگویی بار و بارهای قابل قطع

معادلات (۷) - (۹) مدل‌کننده برنامه پاسخگویی بارهای اکتیو و معادلات (۱۰) - (۱۲) مدل‌کننده برنامه پاسخگویی بارهای توان راکتیو در شبکه توزیع برق است. محدودیت بارهای اکتیو و راکتیو قابل قطع در شبکه توزیع برق نیز به ترتیب از طریق معادلات (۱۳) و (۱۴) مدل‌سازی می‌شود.

$$P_{e,t}^{DR} = (1 - \phi_{e,t}^{DSRL}) P_{e,t}^{DSRL} \quad \forall e, \forall t \quad (7)$$

$$0 \leq \phi_{e,t}^p \leq \Gamma_{LS} \quad \forall e, \forall t \quad (8)$$

$$\sum_t P_{e,t}^{DSRL} \phi_{e,t} = \rho_{LS} \sum_t P_{e,t}^{DSRL} \quad \forall e, \forall t \quad (9)$$

$$Q_{e,t}^{DR} = (1 - \phi_{e,t}^q) Q_{e,t}^{DSRL} \quad \forall e, \forall t \quad (10)$$

$$0 \leq \phi_{e,t}^q \leq \Gamma_{LS} \quad \forall e, \forall t \quad (11)$$

$$\sum_t Q_{e,t}^{DSRL} \phi_{e,t}^q = \rho_{LS} \sum_t Q_{e,t}^{DSRL} \quad \forall e, \forall t \quad (12)$$

$$0 \leq P_{c,t}^{IL} \leq \overline{P}_c^{IL} \quad \forall e, \forall t \quad (13)$$

$$0 \leq Q_{c,t}^{IL} \leq \overline{Q}_c^{IL} \quad \forall e, \forall t \quad (14)$$

۶. سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی

معادله (۱۵) بیان‌کننده نحوه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در باتری‌های مربوطه است. محدودیت (۱۶) نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی در باتری‌ها است. همچنین محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) بیان‌کننده حداکثر

شبیه‌سازی و مطالعات موردی

در این مقاله یک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته شده با اعداد صحیح (MINLP) به منظور کمینه‌کردن هزینه‌های بهره‌برداری و ارتقای تاب‌آوری شبکه توزیع هوشمند برق در حضور سیستم ذخیره‌کننده انرژی و برنامه پاسخگویی بار ارائه شده است. شکل ۱ ساختار شبکه توزیع هوشمند پیشنهادی در این پروژه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، شبکه توزیع پیشنهاد شده در این مقاله مجهز به ۴ منبع تولید پراکنده ۲ توربین بادی و ۲ سیستم فتوولتایک می‌باشد. قابل ذکر است که بارهای موجود در شین‌های ۹ الی ۱۸ و ۲۶ الی ۳۳ قابل شیف‌ت بوده و بارهای موجود در شین‌های ۶، ۲۴ و ۳۲ بارهای قابل قطع هست. محل قرارگیری باتری‌ها نیز در شین‌های ۲۱ ام شبکه توزیع برق می‌باشد. همچنین شبکه توزیع هوشمند پیشنهاد شده در این پروژه با بهره‌گیری از یک سیستم ۳۳ با سه استاندارد مدل‌سازی شده است. به منظور بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع برق یک رویداد احتمالی در پست توزیع برق در نظر گرفته شده است. این رویداد احتمالی منجر به قطع ۶ ساعته شبکه توزیع برق از شبکه بالادستی می‌شود. شکل ۲ مقادیر پیش‌بینی شده برای غیرمصرفی و قیمت بازار برق را نشان می‌دهد. مسئله پیشنهادی در محیط برنامه‌نویسی GAMS و تحت حل‌کننده DICOPT حل شده است. رویکرد پیشنهادی در قالب ۵ مطالعه موردی تجزیه و تحلیل شده است که جزئیات آن به شرح زیر است:

۱. توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار
۲. توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی
۳. توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار

$$\sqrt{\left(P_{i,j,t}^{flow}\right)^2 + \left(Q_{i,j,t}^{flow}\right)^2} \leq S_{i,j,t}^{flow} \quad (20)$$

$$-P_i^{in} \leq P_{i,t}^{in} \leq \overline{P_i^{in}} \quad (21)$$

$$-Q_i^{in} \leq Q_{i,t}^{in} \leq \overline{Q_i^{in}} \quad (22)$$

$$P_t^{in} \Big|_{i=1} + \sum_{v \in A_v^e} P_{v,t}^{PV} + \sum_{g \in A_g^e} P_{g,t}^{DG} + \sum_{e \in A_e^e} P_{e,t}^{DR} + \sum_{c \in A_c^e} P_{c,t}^{IL} \quad (22)$$

$$+ \sum_{b \in A_b^e} (P_{b,t}^D - P_{b,t}^C) = \sum_{e \in A_e^e} P_{e,t}^{DSRL} + \sum_{d \in A_d^e} P_{d,t}^{DSNRL} + \sum_{j \in A_j^e} P_{i,j,t}^{flow}$$

$$Q_t^{in} \Big|_{i=1} + \sum_{g \in A_g^e} Q_{g,t}^{DG} + \sum_{e \in A_e^e} Q_{e,t}^{DR} + \sum_{c \in A_c^e} Q_{c,t}^{IL} \quad (23)$$

$$= \sum_{e \in A_e^e} Q_{e,t}^{DSRL} + \sum_{d \in A_d^e} Q_{d,t}^{DSNRL} + \sum_{j \in A_j^e} Q_{i,j,t}^{flow}$$

۸. محدودیت توان تولیدی باد و بهینه‌سازی روبات

باتوجه به اینکه ماهیت توان تولیدی باد و سیستم‌های فتوولتایک به صورت غیرقطعی می‌باشد، لذا پیش‌بینی دقیق توان تولیدی باد و سیستم‌های فتوولتایک توسط اپراتور سامانه چند انرژی کار دشواری می‌باشد. بدین منظور اپراتور شبکه توزیع برق برای مقاوم کردن شبکه توزیع برق در مقابل رفتار نوسانی توان بادی و سیستم فتوولتایک از رویکرد بهینه‌سازی مقاوم استفاده می‌کند. بدین ترتیب برای مدل‌سازی بهینه‌سازی مقاوم از محدودیت‌های (۲۴) - (۳۱) بهره می‌گیریم [۱۳].

$$P_{w,t}^{WT} - x_{w,t}^{WT} P_{w,t}^{WT-max} + z_{w,t}^{WT} \Gamma^{WT} + P_{w,t}^{WT} \leq 0 \quad (24)$$

$$z_{w,t}^{WT} + P_{w,t}^{RO-WT} \geq P_{w,t}^{WT-Dev} y_{w,t}^{WT} \quad (25)$$

$$-y_{w,t}^{WT} \leq x_{w,t}^{WT} \leq y_{w,t}^{WT} \quad (26)$$

$$y_{w,t}^{WT}, P_{w,t}^{RO-WT}, z_{w,t}^{WT} > 0 \quad x_{w,t}^{WT} = 1 \quad (27)$$

$$P_{v,t}^{PV} - x_{v,t}^{PV} P_{v,t}^{PV-max} + z_{v,t}^{PV} \Gamma^{PV} + P_{v,t}^{PV} \leq 0 \quad (28)$$

$$z_{v,t}^{PV} + P_{v,t}^{RO-PV} \geq P_{v,t}^{PV-Dev} y_{v,t}^{PV} \quad (29)$$

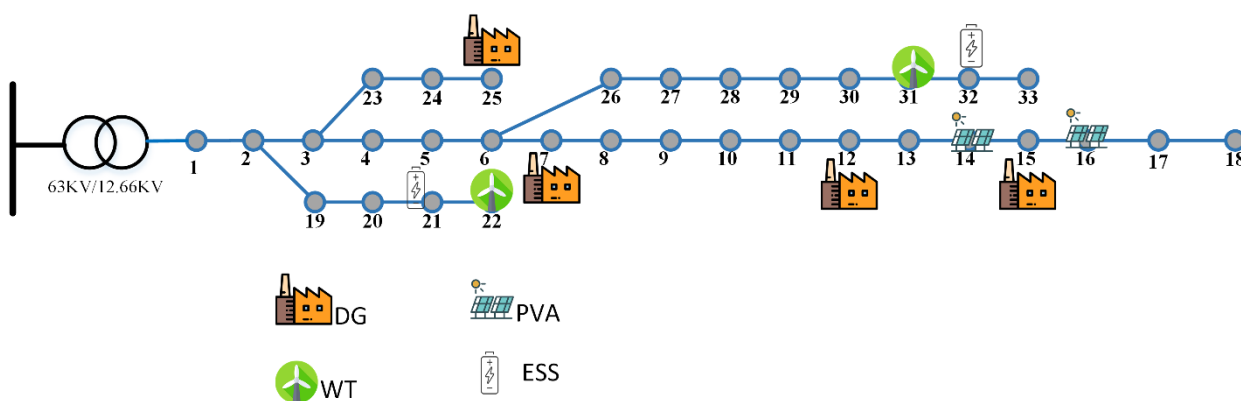
$$-y_{v,t}^{PV} \leq x_{v,t}^{PV} \leq y_{v,t}^{PV} \quad (30)$$

$$y_{v,t}^{PV}, P_{v,t}^{RO-PV}, z_{v,t}^{PV} > 0 \quad x_{v,t}^{PV} = 1 \quad (31)$$

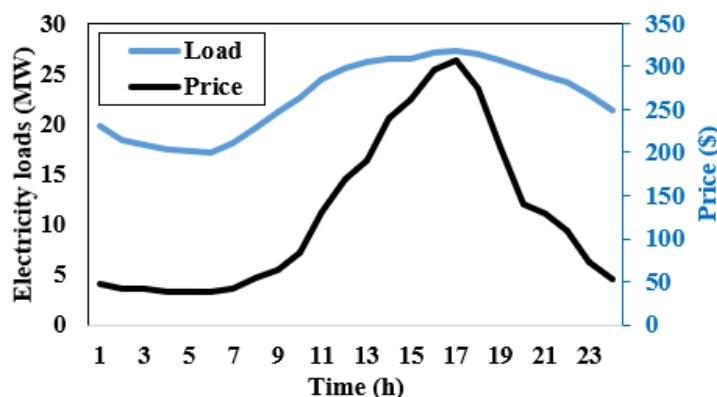
1. Mixed integer linear programming

طریق شبکه بالادستی خریداری می‌شود. همچنین، DG ها، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک به ترتیب ۴۲/۴۹٪، ۹/۶۹٪ و ۶/۵۲٪ از بارهای مصرفی شبکه توزیع هوشمند را تأمین می‌کنند. نهایتاً، ۰/۹۳٪ از بارهای مصرفی نیز بدون تأمین باقی می‌مانند (حذف بار می‌شوند). در مطالعه موردی اول کل هزینه بهره‌برداری ۵۱۳۶۷/۹۹ دلار بر مگاوات ساعت محاسبه شده است.

۴. توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار
 ۵. بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع هوشمند برق با استفاده از سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار
 مطالعه موردی ۱: در این مطالعه موردی توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ برنامه‌ریزی بهینه ساعتی تأمین توان اکتیو شبکه توزیع برق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ۴۰/۳۵٪ از کل توان مصرفی شبکه توزیع هوشمند از

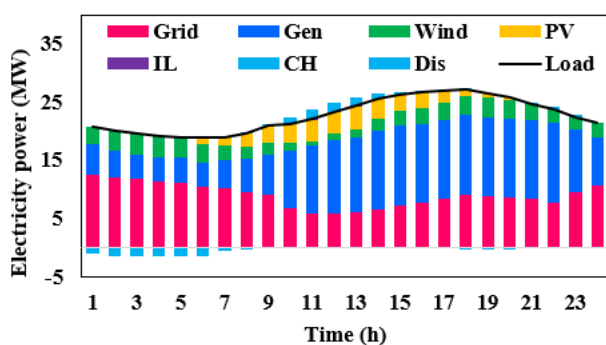


شکل ۱: ساختار شبکه توزیع برق پیشنهادی

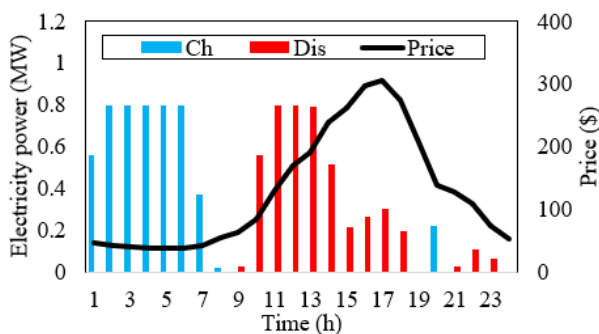


شکل ۲: مقدار پیش‌بینی شده برای بار مصرفی و قیمت بازار برق شبکه توزیع برق

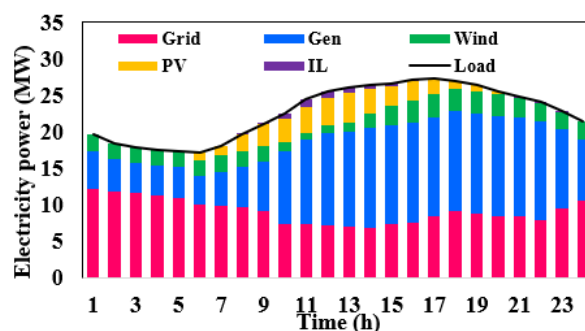
ذخیره‌سازی سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی نیز توسط شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل منحنی‌های میله‌ای نشان‌دهنده نحوه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی بوده و منحنی خطی نیز بیانگر ظرفیت سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی است. همان‌طور که مشخص است، در ساعت‌های ابتدای سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی شروع به شارژ گردید و ظرفیت باتری نیز رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند. همچنین، از ساعت ۸ به بعد با دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی ظرفیت باتری نیز به تدریج کاهش می‌یابد. در مطالعه موردی دوم کل هزینه بهره‌برداری ۴۷۹۱۷/۷۶ دلار بر مگاوات محاسبه شده است که نسبت به مطالعه موردی اول ۳۴۵۰/۱۹ دلار بر مگاوات ساعت کاهش یافته است.



شکل ۴: برنامه‌ریزی ساعتی تأمین بهینه توان اکتیو شبکه توزیع برق



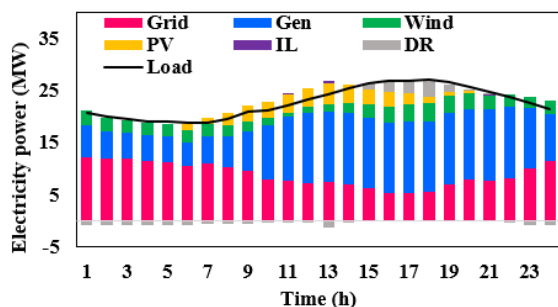
شکل ۵: مقایسه برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی با قیمت بازار برق



شکل ۳: برنامه‌ریزی ساعتی تأمین بهینه توان اکتیو شبکه توزیع برق

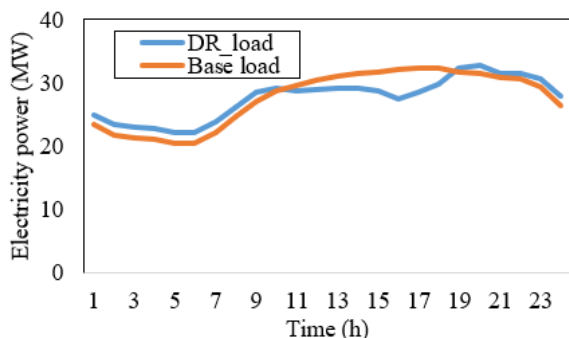
مطالعه موردی ۲: در این مطالعه موردی توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۴ برنامه‌ریزی بهینه ساعتی تأمین توان اکتیو شبکه توزیع برق را در حضور سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی نشان می‌دهد. قابل ذکر است که سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی در شین‌های ۲۱ و ۳۱ شبکه توزیع هوشمند قرار گرفته است. با توجه به شکل ۴، به ترتیب ۴۱/۸۳٪ و ۴۲/۵۹٪ از کل توان مصرفی شبکه توزیع هوشمند توسط شبکه بالادستی و DGها تأمین می‌شود. همچنین، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک به ترتیب ۱۱/۲٪ و ۶/۵٪ از بارهای مصرفی شبکه توزیع هوشمند را تغذیه می‌کنند. نهایتاً، ۰/۸۹٪ از بارهای مصرفی نیز بدون تأمین باقی می‌مانند (حذف بار می‌شوند). شکل ۵ برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی اول را با قیمت بازار برق مقایسه شده است. در این شکل منحنی‌های میله‌ای نشان‌دهنده نحوه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی بوده و منحنی خطی نیز بیانگر قیمت بازار برق است. همان‌طور که از شکل مشخص است، سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی در ساعت‌های ارزان قیمت (یعنی ساعت ۱ الی ۸) شروع به شارژ توان الکتریکی کرده و در ساعت‌های گران قیمت (یعنی ۱۰ الی ۲۳) انرژی ذخیره شده را دشارژ می‌کند. نحوه

توزیع برق از ساعت‌های گران‌قیمت و پیک‌بار به ساعت‌های ارزان‌قیمت و غیرپیک شیفت پیدا کرده‌اند. هزینه کل بهره بر بارداری در مطالعه موردی سوم ۴۷۰۵۰/۱۴ دلار بر مگاوات ساعت محاسبه شده است که نسبت به مورد مطالعاتی اول ۴۳۱۷/۸۴ دلار بر مگاوات ساعت کاهش یافته است.



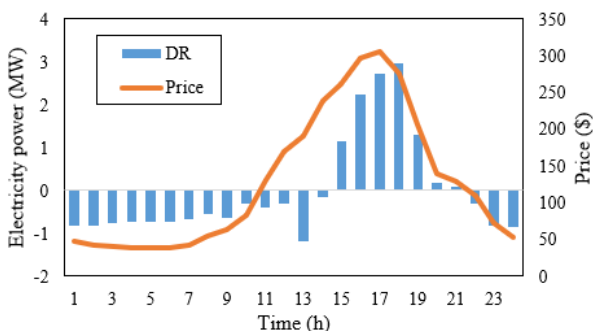
شکل ۷: برنامه‌ریزی بهینه ساعتی تأمین توان اکتیو شبکه

توزیع برق با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی



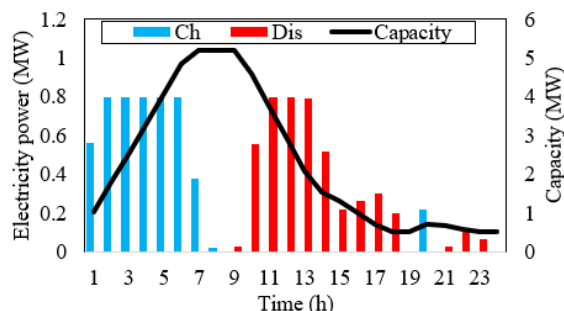
شکل ۸: مقایسه بار مصرفی شبکه توزیع برق با / بدون

در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار



شکل ۹: مقایسه برنامه‌ریزی بهینه جابه‌جایی بارهای الکتریکی

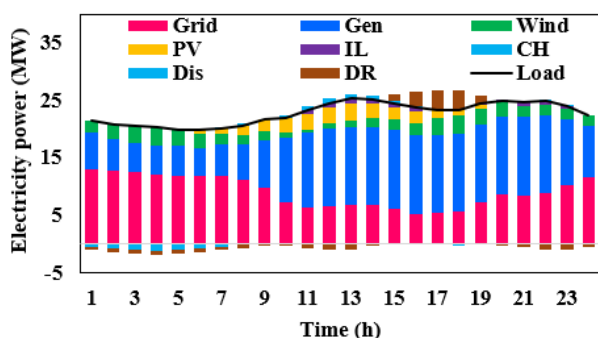
شبکه توزیع برق با قیمت بازار برق



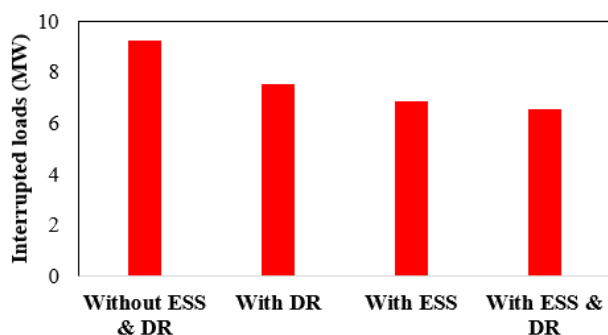
شکل ۶: نحوه ذخیره‌سازی سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی

مطالعه موردی ۳: در این مطالعه موردی توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۷ برنامه‌ریزی بهینه ساعتی تأمین توان اکتیو شبکه توزیع برق را با در نظر گرفتن اعمال برنامه پاسخگویی بار نشان می‌دهد. قابل ذکر است که فقط بارهای موجود در شین‌های ۹ الی ۱۸ و ۲۶ الی ۳۳ بارهای قابل شیفت هستند. با توجه به شکل ۷، به ترتیب ۳۸/۷۸٪ و ۴۴/۲۱٪ از کل توان مصرفی شبکه توزیع هوشمند توسط بازار برق و DGها تأمین می‌شود. همچنین، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک به ترتیب ۱۰/۲۶٪ و ۶/۴۹٪ از توان اکتیو مصرفی شبکه توزیع هوشمند را تأمین می‌کنند. نهایتاً، ۰/۲۴٪ از بارهای مصرفی نیز بدون تأمین باقی می‌ماند (حذف می‌شوند). شکل ۸ بار مصرفی شبکه توزیع برق هوشمند با/بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با به‌کارگیری برنامه پاسخگویی بار مصرف توان الکتریکی در شبکه توزیع برق از ساعت‌های پیک‌بار به ساعت‌های غیرپیک شیفت پیدا می‌کند. شکل ۹ نیز برنامه‌ریزی بهینه جابه‌جایی بارهای الکتریکی شبکه توزیع برق را با قیمت بازار برق مقایسه شده است. در این شکل منحنی‌های میله‌ای نشان‌دهنده نحوه جابه‌جایی بارهای الکتریکی بوده و منحنی خطی نیز بیانگر قیمت بازار برق است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بارهای مصرفی شبکه

که $\Gamma=0$ است؛ یعنی تأثیر عدم قطعیت به کلی نادیده گرفته می‌شود در مقابل زمانی که $\Gamma=1$ یعنی تأثیر عدم قطعیت در محافظه کارترین حالت است. همان طور که از شکل‌ها مشخص است، با افزایش Γ میزان توان تولیدی توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک کاهش یافته و در عوض هزینه‌های بهره‌برداری افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش Γ رویکرد ریسک‌گریزی اپراتور شبکه توزیع برق افزایش یافته اما در مقابل هزینه‌های بهره‌برداری به‌ازای کاهش ریسک عدم قطعیت افزایش پیدا می‌کند.



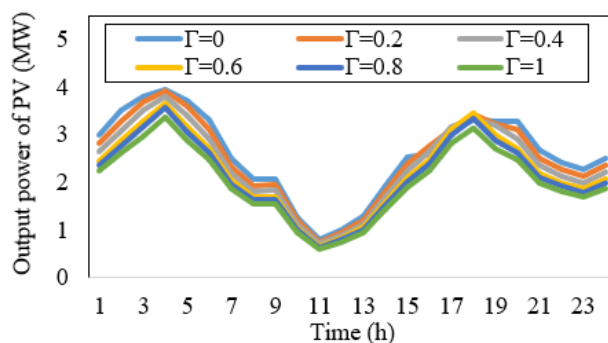
شکل ۱۰: برنامه‌ریزی مقاوم تأمین بهینه توان اکتیو شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی و سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی



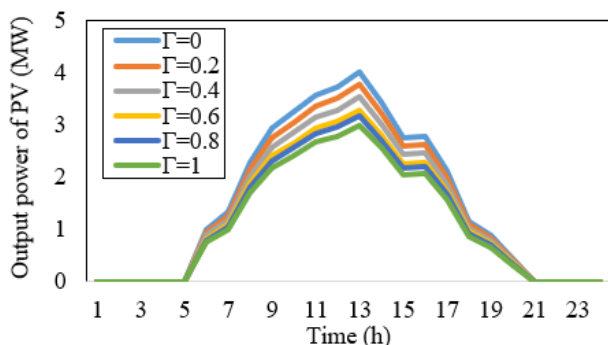
شکل ۱۱: تأثیر منابع انعطاف‌پذیر انرژی بر روی کل بارهای قطع شده تحت بدترین حالت بهینه‌سازی مقاوم

مورد مطالعاتی ۴: در این مطالعه موردی توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۱۰ برنامه‌ریزی مقاوم تأمین بهینه ساعتی توان اکتیو شبکه توزیع برق را با در نظر گرفتن اجرای برنامه پاسخگویی بار و به‌کارگیری سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نتایج نشان‌داده‌شده در شکل ۱۰ تحت بدترین حالت بهینه‌سازی مقاوم (یعنی $\Gamma=1$) هستند. با توجه به شکل ۱۰، به ترتیب ۴۰/۰۵٪ و ۴۴/۹۹٪ از کل توان مصرفی شبکه توزیع هوشمند توسط بازار برق و DGها تأمین می‌شود. همچنین، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک به ترتیب ۸/۹۲٪ و ۴/۸۵٪ از توان اکتیو مصرفی شبکه توزیع هوشمند را تأمین می‌کنند. نهایتاً، ۱/۲۴٪ از بارهای مصرفی نیز بدون تأمین باقی می‌مانند. همان‌طور که مشخص است، سهم توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک در تأمین بهینه بارهای مصرفی به دلیل مقابله با ریسک اثرات نامطلوب عدم قطعیت نسبت به موارد مطالعاتی قبل کاهش چشمگیری داشته است. شکل ۱۱ تأثیر به‌کارگیری منابع انعطاف‌پذیر انرژی را بر روی کل بارهای قطع شده شبکه توزیع برق تحت بدترین حالت بهینه‌سازی مقاوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با به‌کارگیری برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی به ترتیب ۱۸/۵۱٪ و ۲۴/۹۶٪ بارهای تأمین نشده نسبت به حالت بدون منابع انعطاف‌پذیر کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، به‌کارگیری هم‌زمان هر دو سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار منجر به کاهش ۲۹/۶۴٪ از بارهای تأمین نشده می‌شود. شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب آنالیز حساسیت توان تولید توربین‌های بادی، توان تولیدی سیستم‌های فتوولتایک و کل هزینه‌های بهره‌برداری را به‌ازای Γ های مختلف نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر وقتی

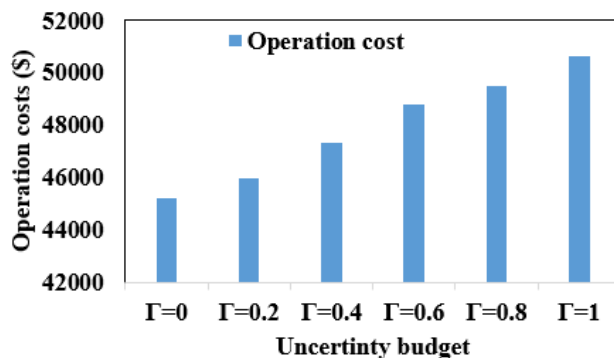
مورد مطالعاتی ۵: در این مورد مطالعاتی تأثیر به کارگیری سیستم‌های ذخیره‌کننده الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر روی بهبود تا آوری شبکه توزیع برق مطالعه می‌شود. بدین منظور فرض می‌شود که شبکه توزیع برق از ساعت ۱۳ الی ساعت ۲۰ از شبکه بالادستی قطعی گردیده و به صورت جزیره‌ای کار می‌کند. شکل ۱۵ برنامه‌ریزی بهینه ساعتی تأمین بارهای الکتریکی شبکه توزیع برق را بدون در نظر گرفتن منابع انعطاف پذیر انرژی نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۱۵، به ترتیب ۲۹/۰۸٪ و ۴۳/۴۰۵٪ از کل توان مصرفی شبکه توزیع هوشمند توسط بازار برق و DGها تأمین می‌شود. همچنین، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتایک به ترتیب ۱۰/۳۶٪ و ۶/۶۵٪ از توان اکتیو مصرفی شبکه توزیع هوشمند را تأمین می‌کنند. نهایتاً، ۱۰/۴۶٪ از بارهای مصرفی نیز بدون تأمین باقی می‌مانند. در شکل ۱۶ تأثیر به کارگیری سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی را بروی کاهش بارهای قطع شده نشان می‌دهد. بدین منظور یک آنالیز حساسیت بر روی کاهش بارهای قطع شده به ازای تعداد سیستم‌های ذخیره‌کننده الکتریکی در شکل ۱۶ انجام شده است. همان‌طور که مشخص با افزایش سیستم‌های ذخیره‌کننده الکتریکی میزان بارهای قطع شده کاهش می‌یابد. شکل ۱۷ نحوه ذخیره‌سازی سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی را در شرایط وقوع رخ داد احتمالی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در ساعات‌های عادی انرژی الکتریکی را ذخیره‌سازی کرده و در ساعات‌های بحرانی انرژی ذخیره شده را به شبکه تزریق می‌کنند. تأثیر به اجرایی برنامه پاسخگویی بار نیز بر روی بارهای قطع شده توسط شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با اجرای برنامه پاسخگویی بار بخشی از مصرف انرژی الکتریکی در شبکه توزیع برق به ساعات‌های مجاور شیفت پیدا می‌کند (به شکل ۱۹ توجه شود) و منجر به کاهش قطعی بار در شبکه



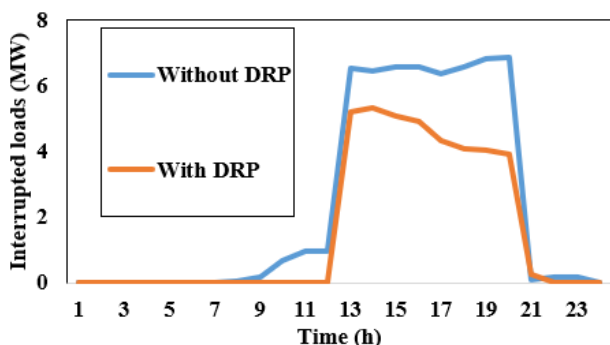
شکل ۱۲: آنالیز حساسیت توان تولیدی باد به ازای Lهای مختلف



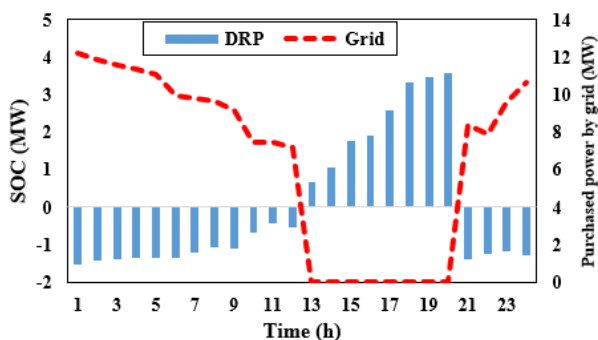
شکل ۱۳: آنالیز حساسیت توان تولیدی فتوولتایک ها به ازای Gammaهای مختلف



شکل ۱۴: آنالیز حساسیت کل هزینه بهره‌برداری به ازای Gammaهای مختلف



شکل ۱۸: میزان قطعی بار با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار



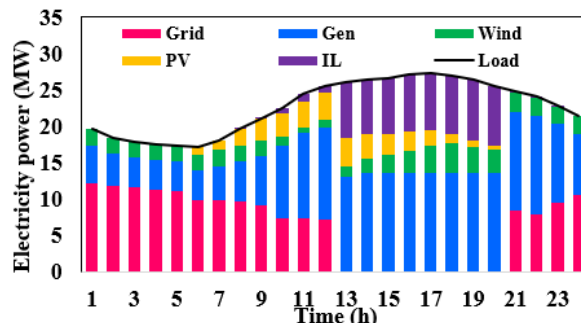
شکل ۱۹: مقایسه برنامه پاسخگویی بار و رویداد احتمالی

نتیجه گیری و جمع بندی

در این مطالعه یک توزیع اقتصادی مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای شبکه های توزیع هوشمند برق با اهداف کاهش هزینه های عملیاتی و بهبود تاب آوری شبکه های توزیع برق پیشنهاد گردید. علاوه برای، تأثیر به کارگیری سیستم های ذخیره کننده الکتریکی و اجرای برنامه پاسخگویی بار با اهداف کاهش هزینه های عملیاتی و بهبود تاب آور مورد بررسی قرار گرفت. اثربخشی رویکرد پیشنهادی در قالب ۵ مورد مطالعاتی بررسی گردید و مزایای آن در نتایج به دست آمده به تفصیل ارائه شد. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. به کارگیری سیستم ذخیره کننده الکتریکی در توزیع اقتصادی شبکه توزیع هوشمند ضمن افزایش انعطاف پذیری کل سیستم توزیع برق باعث صرفه جویی ۳۴۵۰/۱۹ دلار

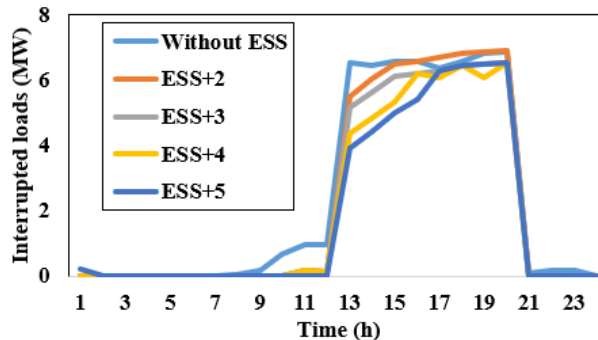
توزیع برق می شود.



شکل ۱۵: برنامه ریزی مقاوم تأمین بهینه توان اکتیو شبکه

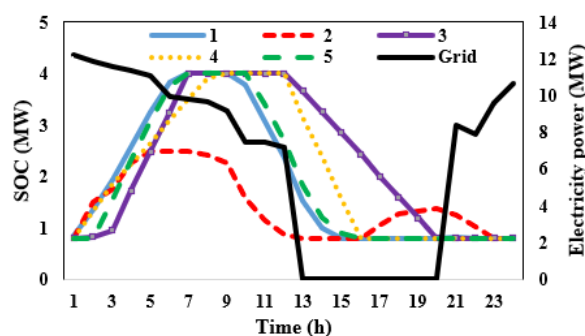
توزیع برق بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی و سیستم

ذخیره کننده الکتریکی



شکل ۱۶: آنالیز حساسیت میزان کاهش بارهای قطع شده

به ازای تعداد سیستم های ذخیره کننده انرژی



شکل ۱۷: نحوه ذخیره سازی سیستم های ذخیره کننده

الکتریکی تحت شرایط وقوع رخ داد احتمالی

۳. اجرای توزیع اقتصادی شبکه توزیع برق بر اساس بهینه‌سازی مقاوم منجر به ارائه یک راه‌حل مقاوم در مقابل نوسانات منابع انرژی می‌شود که ریسک اثرات نامطلوب عدم قطعیت منابع انرژی تجدید را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

سیاسگزاری IRM

بر مگاوات ساعت در یک روز می‌شود. علاوه بر این، دشارژ سیستم‌های ذخیره‌کننده الکتریکی در زمان‌های وقوع رویدادهای احتمالی منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه‌های هوشمند توزیع برق می‌شوند.

۲. مدیریت بهینه شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار ضمن کاهش چشمگیر قطعی بار باعث صرفه‌جویی ۴۳۱۷/۸۴ دلار بر مگاوات در یک روز می‌شود. همچنین، شیفت توان مصرفی شبکه هوشمند برق به ساعت‌های مجاور منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق تحت شرایط وقوع رخدادها با احتمال کم و تأثیر زیاد می‌شود.

منابع

- [1] M. Ghahramani, M. Nazari-Heris, K. Z.- Energy, and undefined 2019, "Energy and reserve management of a smart distribution system by incorporating responsive-loads/battery/wind turbines considering uncertain parameters," Elsevier.
- [2] N. Nasiri, M. Reza Banaei, and S. Zeinali, "A hybrid robust-stochastic approach for unit commitment scheduling in integrated thermal electrical systems considering high penetration of solar power," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 49, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101756.
- [3] P. Sheikahmadi, S. Bahramara, J. Moshtagh, and M. Yazdani Damavandi, "A risk-based approach for modeling the strategic behavior of a distribution company in wholesale energy market," *Appl. Energy*, vol. 214, no. January, pp. 24–38, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.051.
- [4] B. Cortés-Cañedo, F. Molina-Martin, L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, and J. C. Hernández, "Optimal Design of PV Systems in Electrical Distribution Networks by Minimizing the Annual Equivalent Operative Costs through the Discrete-Continuous Vortex Search Algorithm," *Sensors*, vol. 22, no. 3, 2022, doi: 10.3390/s22030851.
- [5] M. H. Ali, S. Kamel, M. H. Hassan, M. Tostado-Véliz, and H. M. Zawbaa, "An improved wild horse optimization algorithm for reliability based optimal DG planning of radial distribution networks," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 582–604, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.12.023.
- [6] R. Fathi, B. Tousi, and S. Galvani, "A new approach for optimal allocation of photovoltaic and wind clean energy resources in distribution networks with reconfiguration considering uncertainty based on info-gap decision theory with risk aversion strategy," *J. Clean. Prod.*, vol. 295, p. 125984, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125984.
- [7] F. Wang et al., "Day-ahead optimal bidding and scheduling strategies for DER aggregator considering responsive uncertainty under real-time pricing," *Energy*, vol. 213, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118765.
- [8] Z. Li, W. Tang, X. Lian, X. Chen, W. Zhang, and T. Qian, "A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network," *Int. J. Electr. Power*

Energy Syst., vol. 135, no. January 2021, p. 107497, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107497.

[9] B. Taheri, A. Safdarian, M. Moeini-Aghaie, and M. Lehtonen, "Distribution System Resilience Enhancement via Mobile Emergency Generators," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 36, no. 4, pp. 2308–2319, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3007762.

[10] C. Chen, J. Wang, S. Member, and F. Qiu, "Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters," pp. 1–9, 2015.

[11] Q. Zhang, Z. Wang, S. Ma, and A. Arif, "Stochastic Pre-Event Preparation for Enhancing Resilience of Distribution Systems," pp. 1–51.

[12] N. L. Deghani, A. B. Jeddi, and A. Shafieezadeh, "INTELLIGENT HURRICANE RESILIENCE ENHANCEMENT OF POWER," pp. 1–21, 2020.

[13] D. Bertsimas and M. Sim, "Robust discrete optimization and network flows," in Mathematical Programming, 2003, vol. 98, no. 1–3, pp. 49–71, doi: 10.1007/s10107-003-0396-4.

IRM

A Resilient Based Resilient Planning for Economical Distribution of Electric Smart Distribution Network in the Presence of Electric Storage Systems and Load Responsive Schedule

P.Parhizgar¹, P.Parhizgar²

1.Master Student, Department of electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2.PhD Student in Electrical Engineering at Department of Electrical Engineering, Isfahan

University of Technology, Isfahan, Iran

*Corresponding author Email: parsa001100par@yahoo.com

Abstract

The challenges of the widespread penetration of renewable energy sources and the participation of the load response program in the optimal supply of electric loads are considered as the main issues of the future intelligent electricity distribution networks. Therefore, it is necessary to develop practical approaches to deal with the fluctuating behavior of renewable energy sources and to improve the resilience of the entire electrical distribution system by flexible energy sources. This paper proposes a robust optimization approach for the economic distribution of a smart electrical distribution network in the presence of renewable energy sources, with the aim of reducing total operating costs and improving resilience through flexible energy sources such as electrical storage systems and load response programs. In the proposed study, the effect of the presence of electric storage system on the management of fluctuating behavior of renewable energy sources in normal conditions and events with low probability and high impact is studied. In addition, the benefits of implementing the load response program in the economic distribution model of the electricity distribution network with the aim of reducing the total operating costs and reducing the interrupted loads will be analyzed. In the proposed approach for modeling the non-deterministic behavior of renewable energy sources in the economic distribution model of the smart electricity distribution network, the robust optimization method is used. In order to validate the proposed model, a standard test system of 33 buses has been used to model the intelligent electricity distribution network. The proposed problem is modeled in the form of a mixed integer non-linear programming and simulated in the GAMS software environment and solved under the powerful CPLEX solver. Solving the proposed problem leads to providing an optimal solution that makes the optimal planning of the smart power distribution network resistant to the adverse fluctuating behaviors of renewable energy sources. In addition, the results of the simulations confirm the effectiveness of the proposed approach in reducing outage loads for distribution network consumers.

Keywords: Electric intelligent distribution network, resilience, electric storage systems, load response program, resilient optimization