Vol. 5, No. 14, Apr-Jun 2025,(96-104)
Journal of New Achievements in Electrical, Computer and Technology (JNAECT)
مجله دستاوردهای نوین در برق،کامپیوتر و فناوری
دوره ۵، شماره ۱۴، بهار ۱۴۰۴ (۱۰۴-۹۶)
journal homepage: https://jnaect.ir

برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال مقید به تاب آوری شبکه انتقال در برابر سیل و زلزله

احسان اکبری [1]

[1] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده

در این مقاله، برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال مقید به تاب آوری (RCGTEP) شبکه انتقال در برابر بلایای طبیعی از قبیل زلزله و سیل ارائه می‌شود. از اینرو طرح پیشنهادی به‌صورت یک مسأله دوهدفه مدل‌سازی می‌شود که در یک تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های احداث و بهره‌بردرای منابع تاب آوری (RSها) و مد نظر است، و در تابع هدف دیگر کمینه-سازی انرژی مورد انتظار تغذیه نشده (EENS) در اثر خاموشی سیستم در برابر بلایای طبیعی مذکور فرمول‌بندی خواهد شد. همچنین طرح پیشنهادی مقید به معادلات پخش توان بهینه AC (AC-OPF)، مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری RSها از قبیل واحدهای تولید، خطوط انتقال مستحکم، ادوات FACTS سری و موازی (SF و PF)، و محدودیت‌های تاب آوری و پایداری زاویه‌ای سیستم قدرت در برابر زلزله و سیل در حضور بارهای بحرانی و غیربحرانی می‌باشد. این استراتژی دارای عدم قطعیت دسترس‌پذیری RSها در شرایط بلایای طبیعی است، لذا مدل‌سازی تصادفی برای RCGTEP اتخاذ خواهد شد. در نهایت، نتایج عددی بدست آمده با اجرای استراتژی پیشنهادی برروی شبکه‌های انتقال استاندارد IEEE تأیید کننده قابلیت‌های این طرح در بهبود همزمان شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری، پایداری زاویه‌ای و تاب آوری سیستم قدرت است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه، سیل و زلزله، منابع تاب آوری، قید اپسیلن، شبکه انتقال.

1. مقدمه

این در زمینه برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در [1]، برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال[1] (GTEP) با در نظر گرفتن قیود آلایندگی زیست محیطی و مدل بازار انرژی فرمول‌بندی شده است. در این طرح ارائه شده، منابع تجدیدپذیر به منظور کاهش آلودگی زیست محیطی استفاده می‌گردد، و همچنین انتقال توان مابین نواحی مختلف در GTEP مذکور مدل‌سازی شده است. در [2]، GTEP دو هدفه جهت کمینه‌سازی هزینه‌های احداث و بهره‌برداری واحدهای تولید در یک تابع هدف، و کمینه‌سازی تلفات شبکه در تابع هدف دوم ارائه شده است، که در این طرح چندین نوع مختلف واحد تولید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مدل‌سازی شده است. در [3 و 4] قابلیت اطمینان متناسب با پیشامد $N-1$ در اثر وقوع خطای دخلی تجهیزات شبکه انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. در [5] نیز PSEP با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مدل‌سازی شده است. برخی از تحقیقات مانند [6 و 7] مسأله طرح GTEP برپایه پخش توان AC (AC-GTEP) را مدل‌سازی کرده‌اند. در [6] بهبود تلفات و پایداری ولتاژ در GTEP در نظر گرفته شده است، و در [7] پایداری ولتاژ متناسب با روش L-index به GTEP اضافه شده است. در [8] نیز AC-GTEP به همراه برنامه‌ریزی ذخیره‌سازهای انرژی به منظور دستیابی به انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان بالا در شبکه انتقال مدل‌سازی شده است، که همانند [9] یک مدل خطی عدد صحیح[2] (MILP) برای آن در قدم بعدی بدست آمده است که قابل حل با روش‌های ریاضی مرسوم است. برنامه‌ریزی شبکه انتقال و سیستم گازی با در نظر گرفتن شاخص تاب آوری در [10] فرمول‌بندی شده است. همچنین در [11] تاب آوری برپایه روش گرافیکی در PSEP مورد بررسی قرار گرفته است.

این مقالهGTEP مقید به تاب آوری[3] (RCGTEP) به‌صورت یک مسأله دو هدفه ارائه می‌دهد. در طرح پیشنهادی تابع هدف اول کمینه‌سازی مجموعه هزینه احداث RSها و هزینه مورد انتظار بهره‌برداری واحدهای تولید را فرمول‌بندی می‌کند. در تابع هدف دوم به منظور مدل‌سازی تا آوری سیستم، کمینه‌سازی انرژی مورد انتظار تغذیه نشده[4] (EENS) در پشامد $N-k$ رخداده در شرایط وقوع سیل و زلزله بیان می‌شود. در این طرح RS شامل خطوط انتقال مستحکم، واحد تولید، PF و SF است. مسأله RCGTEP پیشنهادی مقید به معادلات پخش توان بهینه AC (AC-OPF)، مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری RSها، و محدودیت‌های تاب آوری و پایداری زاویه‌ای سیستم در شرایط وقوع سیل و زلزله در حضور بارهای بحرانی و غیر بحرانی خواهد بود. توجه شود که دسترس‌پذیری RSها دارای عدم قطعیت است، از اینرو مدل‌سازی تصادفی برای RCGTEP اتخاذ می‌شود. در ادامه مدل‌سازی RCGTEP تک هدفه برپایه روش بهینه‌سازی پارتو مبنی بر قید اپسیلن استخراج می‌شود داشته باشد.

2. فرمول‌بندی طرح پیشنهادی

الف) مدل چند هدفه: مدل مسأله پیشنهادی به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min \ Cost = \sum_{g\in\Xi_G} C_g^G x_g^G + \sum_{n,j\in\Xi_N}\sum_{b\in\Xi_{B(n,j)}} \left(C_{n,j,b}^L x_{n,j,b}^L + C_{n,j,b}^{SF} x_{n,j,b}^{SF}\right) + \sum_{p\in\Xi_{PF}} C_p^{PF} x_p^{PF} + \sum_{s\in\Xi_S} \pi_s \sum_{g\in\Xi_G}\sum_{l\in\Xi_L} du_l C_g^{OP} P_{g,l,s}^G \quad (1)$$

[1]Generation and transmission expansion planning (GTEP)

[2] Mixed integer linear programming (MILP)

[3]Resiliency constrainted GTEP (RCGTEP)

[4] Expected energy not supplied (EENS)

$$\min \quad EENS = \frac{OH}{8760} \sum_{s\in\Xi_S} \pi_s \sum_{d\in\Xi_D} \sum_{l\in\Xi_L} du_l L^{NS}_{d,l,s} \tag{2}$$

به شرطی که:

$$\sum_{g\in\Xi_G} A^G_{g,n} P^G_{g,l,s} - \sum_{j\in\Xi_N} \sum_{b\in\Xi_{B(n,j)}} A^L_{n,j} P^L_{n,j,b,l,s} = \sum_{d\in\Xi_D} A^D_{d,n} \left(P^D_{d,l,s} - L^{NS}_{d,l,s}\right) \quad \forall n,l,s \tag{3}$$

$$\sum_{g\in\Xi_G} A^G_{g,n} Q^G_{g,l,s} + \sum_{p\in\Xi_{PF}} A^{PF}_{p,n} Q^{PF}_{p,l,s} - \sum_{j\in\Xi_N} \sum_{b\in\Xi_{B(n,j)}} A^L_{n,j} Q^L_{n,j,b,l,s} = \sum_{d\in\Xi_D} A^D_{d,n} Q^D_{d,l,s} \quad \forall n,l,s \tag{4}$$

$$P^L_{n,j,b,l,s} = G^L_{n,j,b,s} \left(V_{n,l,s}\right)^2 - V_{n,l,s} V_{j,l,s} \left(G^L_{n,j,b,s} \cos\left(\theta_{n,l,s} - \theta_{j,l,s}\right) + B^L_{n,j,b,s} \sin\left(\theta_{n,l,s} - \theta_{j,l,s}\right)\right) \quad \forall n,j,b,l,s \tag{5}$$

$$Q^L_{n,j,b,l,s} = -B^L_{n,j,b,s} \left(V_{n,l,s}\right)^2 - V_{n,l,s} V_{j,l,s} \left(G^L_{n,j,b,s} \sin\left(\theta_{n,l,s} - \theta_{j,l,s}\right) - B^L_{n,j,b,s} \cos\left(\theta_{n,l,s} - \theta_{j,l,s}\right)\right) \quad \forall n,j,b,l,s \tag{6}$$

$$\sqrt{\left(P^L_{n,j,b,l,s}\right)^2 + \left(Q^L_{n,j,b,l,s}\right)^2} \le \bar{S}^L_{n,j,b} \quad \forall n,j,b,l,s \tag{7}$$

$$\underline{V} \le V_{n,l,s} \le \bar{V} \quad \forall n,l,s \tag{8}$$

$$-\bar{\theta} \le \theta_{n,l,s} \le \bar{\theta} \quad \forall n,l,s \tag{9}$$

$$0 \le L^{NS}_{d,l,s} \le \varsigma_d P^D_{d,l,s} \quad \forall d,l,s \tag{10}$$

$$\underline{P}^G_g x^G_g u^G_{g,s} \le P^G_{g,l,s} \le \bar{P}^G_g x^G_g u^G_{g,s} \quad \forall g,l,s \tag{11}$$

$$\underline{Q}^G_g x^G_g u^G_{g,s} \le Q^G_{g,l,s} \le \bar{Q}^G_g x^G_g u^G_{g,s} \quad \forall g,l,s \tag{12}$$

$$\underline{Q}^{PF}_p x^{PF}_p u^{PF}_{p,s} \le Q^{PF}_{p,l,s} \le \bar{Q}^{PF}_p x^{PF}_p u^{PF}_{p,s} \quad \forall p,l,s \tag{13}$$

$$G^L_{n,j,b,s} = \frac{R^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s}}{\left(R^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s}\right)^2 + \left(X^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s} - X^{SF}_{n,j,b,s}\right)^2} \quad \forall n,j,b,s \tag{14}$$

$$B^L_{n,j,b,s} = -\frac{X^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s} - X^{SF}_{n,j,b,s}}{\left(R^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s}\right)^2 + \left(X^L_{n,j,b} x^L_{n,j,b} u^L_{n,j,b,s} - X^{SF}_{n,j,b,s}\right)^2} \quad \forall n,j,b,s \tag{15}$$

$$0 \le X^{SF}_{n,j,b,s} \le \gamma X^L_{n,j,b} x^{SF}_{n,j,b} u^{SF}_{n,j,b,s} u^L_{n,j,b,s} \quad \forall n,j,b,s \tag{16}$$

$$x^{SF}_{n,j,b} \le x^L_{n,j,b} \quad \forall n,j,b \tag{17}$$

در روابط (1) و (2)، توابع هدف مسأله RCGTEP پیشنهادی بیان شده است، که رابطه (1) بیانگر کمینه‌سازی مجموع هزینه سالیانه توسعه شبکه انتقال و یا هزینه سالیانه احداث RSها بعلاوه هزینه سالیانه مورد انتظار بهره‌برداری واحدهای تولید می‌باشد [9]. در رابطه (2)، کمینه‌سازی EENS به منظور بررسی تاب آوری شبکه در برابر بلایای طبیعی ارائه شده است

[12]. در این رابطه، EENS برابر مجموع توان تغذیه نشده همه بارها در کلیه ساعات خاموشی[5] (OH) در نواحی مختلف شبکه بر اثر بلایای طبیعی از قبیل سیل و زلزله است. قیود AC-OPF در روابط (3)-(9) ارائه شده است، که به ترتیب معرف تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس‌های شبکه، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط انتقال، و محدودیت‌های فنی شبکه از قبیل محدودیت ظرفیت خطوط انتقال، محدودیت دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها هستند [13]. قابل توجه است که این امکان وجود دارد که درصورت وقوع سیل و یا زلزله برخی از تجهیزات شبکه مانند واحد تولید و خطوط انتقال از مدار خارج شوند، به عبارتی پیشامد N – k رخ دهد. از اینرو انتظار می‌رود که پایداری زاویه قدرت واحدهای تولید در شرایط مطلوب قرار نگیرد. بدین منظور قید (9) به طرح RCGTEP پیشنهادی در این مقاله اضافه می‌شود، تا اینکه آن با احداث عناصر مناسب در شبکه بتواند پایداری ذکر شده را حتی در شرایط بحرانی عملکرد سیستم قدرت حفظ کند. یک محدودیت دیگر تاب آوری نیز در (10) ذکر شده است، که پیرو آن میزان بار خاموش شده یک منطقه[6] (d) بخشی از بار درخواستی آن منطقه می‌باشد که متناسب با ضریب ζ است. بارها در این مقاله به دو دسته بارهای بحرانی و غیر بحرانی دسته‌بندی شده‌اند.

قیود RSها در روابط (11)-(17) ذکر شده است، به‌طوری که منحنی قابلیت واحدهای تولید در قیدهای (11) و (12) ذکر شده است، و آن اشاره به محدودیت توان اکتیو تولید و توان راکتیو تولیدی/مصرفی این واحدها دارد [14]. همچنین محدودیت مجاز کنترل توان راکتیو ادوات FACTS موازی در قید (13) فرمول‌بندی شده است [8]. علاوه بر این توجه شود که در روابط (3-5) و (3-6)، میزان رسانایی و سوسپتانس خط انتقال به علت متغیر بودن وضعیت احداث این خط (x_L) و میزان راکتانس SFهای سری شده با این خط به‌صورت متغیر تعریف می‌شوند. این متغیرها به ترتیب از روابط (14) و (15) قابل محاسبه هستند. در قید (16) نیز محدودیت کنترل راکتانس خازنی SF مدل‌سازی شده است، و در قید منطقی (17) به این موضوع اشاره دارد که یک SF هنگامی می‌تواند با یک خط انتقال به‌صورت سری اتصال یابد، به شرطی که آن خط در شبکه احداث شده باشد.

ب) مدل تک هدفه: مسأله RCGTEP ارائه شده در بخش پیشین، (1)-(17)، دارای چارچوب بهینه‌سازی دوهدفه است. لذا برای دستیابی به فرمول‌بندی یکپارچه و یا تک هدفه نیاز به تکنیک بهینه‌سازی پارتو است. روش‌های مختلفی برای اجرای این تکنیک وجود دارد، اما به دلیل سادگی مدل‌سازی، روش قید اپسیلن برای این منظور استفاده خواهد شد [15]. فرآیند روش مذکور برای مسأله RCGTEP پیشنهادی بدین صورت است که [15] تابع هدف Cost در رابطه (1) به عنوان تابع هدف مسأله RCGTEP تک هدفه، (18)-(20)، همانند رابطه (18) در نظر گرفته می‌شود. همچنین تابع هدف دوم یعنی EENS در رابطه (2) به‌صورت قید (19) محدود به ε_{EENS} در این مسأله جدید در نظر گرفته می‌شود. البته بایستی گفت که محدودیتی در تعویض جایگاه‌های توابع هدف مذکور نیست. به عبارتی، تابع هدف مسأله جدید می‌تواند برابر کمینه‌سازی EENS باشد، و تابع Cost به‌صورت یک قید محدود به ε_{Cost} در نظر گرفته شود. قابل توجه است که پاسخ بهینه در دو مسأله بیان شده یکسان خواهد بود. در ادامه قیود دیگر مسأله RCGTEP تک هدفه همانند رابطه (20) برابر قیود (3)-(17) می‌باشد.

$$\min \quad Cost = \sum_{g\in\Xi_G} C_g^G x_g^G + \sum_{n,j\in\Xi_N} \sum_{b\in\Xi_{B(n,j)}} \left(C_{n,j,b}^L x_{n,j,b}^L + C_{n,j,b}^{SF} x_{n,j,b}^{SF}\right) + \sum_{p\in\Xi_{PF}} C_p^{PF} x_p^{PF} + \sum_{s\in\Xi_S} \pi_s \sum_{g\in\Xi_G} \sum_{l\in\Xi_L} du_l C_g^{OP} P_{g,l,s}^G \tag{18}$$

به شرطی که:

[5]Outage hours (OH)

[6]Zone

$$\frac{OH}{8760}\sum_{s\in\Xi_S}\pi_s\sum_{d\in\Xi_D}\sum_{l\in\Xi_L}du_l L^{NS}_{d,l,s}\le\varepsilon_{EENS}:\bar{\mu}^{eens} \tag{19}$$

قیود (3-3)-(17-3) (20)

در مسأله بالا، ε_{EENS} مابین حداقل و حداکثر مقدار EENS، یعنی $EENS^{min}$ و $EENS^{max}$، تغییر خواهد کرد. میزان $EENS^{min}$ ($EENS^{max}$) از مسأله‌ای با تابع هدف رابطه (2) (رابطه (1)) و قیود (3)-(17) بدست خواهد آمد. این بدین دلیل است که پیش‌بینی می‌شود که توابع Cost و EENS از نظر افزایش/کاهش دارای جهت‌های مختلفی باشند، به‌طوری که کاهش EENS متناظر با افزایش Cost باشد. بنابراین کمینه‌ترین (بیشترین) مقدار EENS از مسأله ارائه شده در بخش 2-الف با در نظر گرفته تنها تابع هدف EENS (Cost) محاسبه می‌شود. علاوه بر این، به علت در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ε_{EENS}، مقادیر متفاوتی برای EENS و Cost بدست می‌آید که با قرارگیری آنها در یک مجموعه، مجموعه جبهه پارتو قابل ارزیابی خواهد بود. قدم بعدی در تکنیک بهینه‌سازی پارتو دستیابی به بهترین نقطه مصالحه مابین توابع هدف مذکور است. برای این منظور از روش تصمیم‌گیری فازی[۷] (FDM) در این مقاله استفاده می‌شود که جزئیات آن در [15] ارائه شده است.

ج) مدل‌سازی عدم قعیت بلایای طبیعی: در این مقاله فرض شده است که امکان وقوع بلایای طبیعی از قبیل سیل و زلزله در نواحی مختلف شبکه انتقال وجود دارد. این موضوع امکان دارد که باعث خروج خط انتقال، ادوات FACTS سری و موازی و واحد تولید از سیستم قدرت شود. در این مقاله دسترس‌پذیری عناصر مذکور در شرایط وقوع سیل و زلزله به ترتیب با پارامترهای u^L، u^{SF}، u^{PF} و u^G نمایش داده می‌شوند. این عبارت‌ها به علت نا مشخص بودن وضعیت دسترس‌پذیری عناصر مذکور در شرایط وقوع بلایای طبیعی به‌صورت پارامتر عدم قطعیت خواهند بود. همچنین این پارامترها دارای دو مقدار 0 و 1 هستند، که مقدار صفر/یک آن برای یک عنصر به معنی عدم دسترس‌پذیری (قطع شدن عنصر از شبکه) / دسترس‌پذیری (اتصال عنصر به شبکه) عنصر مربوطه در شبکه است. در ادامه در این مقاله از برنامه‌ریزی تصادفی جهت مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مذکور استفاده می‌شود. جزئیات آن در [16] ارائه شده است.

3. نتایج عددی

شبکه 118 باسه IEEE دارای 54 واحد تولید، 186 خط انتقال و 91 باس بار است. اطلاعات این شبکه در [17] ارائه شده است. در این بخش فرض شده است که در مکان واحد تولید موجود، یک واحد تولید دیگر با مشخصات یکسان می‌تواند احداث شود که هزینه احداث آن برابر 40 $/kVA/year. این فرض برای خطوط انتقال نیز برقرار است، با این تفاوت که هزینه احداث آن برابر 5 $/kVA/year. FOR برای خطوط انتقال و واحدهای تولید موجود به ترتیب برابر 30٪ و 40٪ در نظر گرفته می‌شود، ولی آن برای خطوط و واحدهای کاندید برابر 0.1٪ و 3٪ است. هر خط کاندید می‌تواند دارای یک SF باشد. همچنین فرض بر این است که در هر باس یک PF از نوع جبرانساز وار استاتیکی[۸] (SVC) با ظرفیت 20 kVAr قابل نصب است که هزینه احداث (FOR) آن برابر 4 $/kVAr (1٪) می‌باشد. مشخصات پیک بار در [17] ارائه شده است، ولی میزان ضریب قدرت، ضریب بار در سطوح مختلف بار و دیگر موارد آن همانند اطلاعات [18] است. برنامه‌ریزی برای 5 سال می‌باشد و وقوع سیل یا زلزله در این 5 سال یک بار احتمال رخداد دارند. در این بخش فرض است که باس‌های 1-59 و خطوط مابین آنها در محدوده وقوع سیل هستند، و باس‌های 60-118 و خطوط مابین آنها در نواحی وقوع زلزله قرار دارند. عبارت OH برابر 720 ساعت، و بهینه‌سازی تصادفی در این بخش 60 سناریو ایجاد می‌کند.

[7] Fuzzy decision method (FDM)

[8] Static var compensator (SVC)

نتایج این بخش برای موارد مطالعاتی زیر در جدول (1) و (2) خلاصه شده است:

- Case I: مسأله RCGTEP شامل واحد تولید به عنوان RS
- Case II: مسأله RCGTEP شامل واحد تولید و خطوط انتقال به عنوان RS
- Case III: مسأله RCGTEP شامل واحد تولید، خطوط انتقال و SF به عنوان RS
- Case IV: مسأله RCGTEP شامل واحد تولید و PF به عنوان RS
- Case V: مسأله RCGTEP شامل واحد تولید، خطوط انتقال، SF و PF به عنوان RS
- Case VI: Case V به ازای تاب آوری بالا یعنی EENS و OC برابر صفر

براساس نتایج جدول (1)، با استفاده از تعداد انواع مختلف RSها در مسأله RCGTEP می‌توان شاخص‌های تاب آوری، بهره‌برداری، پایداری استاتیکی و اقتصادی را بهبود داد. به‌طوری که EL، MVD، MVA، EENS، Cost کاهش می‌یابند. زیرا که هر نوع RS حداکثر توانایی در بهبود شاخص‌های مذکور دارند، ولی اگر انواع مختلفی RS استفاده شود، به‌طوری که در سطح وسیعی از شبکه تقسیم می‌شوند، می‌توان نتایج مطلوب‌تری بدست آورد. ولی توجه شود که به علت افزایش تعداد RSهای کاندید در مورد V، زمان محاسباتی آن نسبت به موارد دیگر بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، افزایش NPL موجب افزایش مقادیر شاخص‌های مختلف می‌شود، ولی افزایش به‌گونه‌ای مقادیر مجاز آنها رعایت شده است. در نهایت براساس جدول (2) مشاهده می‌شود که میزان VOLL در بهترین نقطه مصالحه در مورد V برای NPLهای 12000 و 14000 MW به ترتیب برابر 7.24 و 8.58 k$/MWh است، که پیرو آن هزینه خاموشی به ترتیب برابر 1.18 و 2.07 G$ خواهد بود. ولی سیستم با تاب آوری بالا یعنی EENS و OC صفر برای NPLهای 12000 و 14000 به ترتیب به ازای VOLLهای 17.72 و 20.11 k$/MWh بدست می‌آیند. در این صورت هزینه برنامه‌ریزی به ترتیب در حدود 17٪ (16.24/(16.24 – 5.53)) و 61.3٪ (18.19/(18.19 – 7.04)) در مورد VI نسبت به مورد V افزایش خواهند یافت. بنابراین جهت دستیابی به سیستم با تاب آوری بالا نیاز به هزینه برنامه‌ریزی بالااست.

جدول 1- نتایج RCGTEP در موارد مختلف

NPL (MW)	مورد	میزان شاخص‌های فنی در یک سال برنامه‌ریزی				Cost (G$)		زمان محاسباتی (ثانیه)
		EL (TWh)	MVD (p.u)	MVA (درجه)	EENS (TWh)	احداث	بهره‌برداری	
12000	I	2/25	0/0213	84	0/182	5/32	1/17	542
	II	2/09	0/0211	80	0/171	4/98	0/98	593
	III	2/06	0/0208	78	0/169	4/93	0/97	608
	IV	2/15	0/0211	81	0/178	5/13	1/02	586
	V	2/01	0/0205	75	0/163	4/67	0/86	632
14000	I	2/62	0/0248	89	0/263	6/84	1/43	597
	II	2/46	0/0242	85	0/249	6/27	1/21	644

III	2/44	0/0239	83	0/247	6/19	1/19	659
IV	2/51	0/0241	86	0/258	6/44	1/31	630
V	2/38	0/0233	80	0/242	5/92	1/12	681

جدول 2- میزان شاخص‌های تاب‌آوری در موارد V و VI به ازای NPLهای مختلف

NPL (MW)	مورد	VOLL (k$/MWh)	EENS (TMWh)	هزینه خاموشی (G$)	هزینه برنامه‌ریزی (G$)
12000	V	7/24	0/163	1/18	5/53
	VI	17/72	0	0	16/24
14000	V	8/58	0/242	2/07	7/04
	VI	20/11	0	0	18/19

4. نتیجه گیری

این مقاله مسأله RCGTEP در شبکه انتقال به ازای وقوع سیل و زلزله بیان کرد. به‌طور که در طرح پیشنهادی، یک مسأله بهینه‌سازی دو هدفه بیان شد که در تابع هدف اول، مجموعه هزینه احداث RSها و هزینه مورد انتظار بهره‌برداری واحدهای تولید کمینه شد، و در تابع هدف دوم، EENS کمینه شد. مسأله مذکور مقید به معادلات AC-OPF، محدودیت‌های تاب آوری و پایداری استاتیکی در حضور بارهای بحرانی و غیر بحرانی، و معادلات بهره‌برداری و برنامه‌ریزی RSها مانند واحد تولید، خط انتقال، SF و PF است. برنامه‌ریزی تصادفی جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در این مقاله استفاده گردید. در نهایت براساس نتایج عددی مشاهده گردید که طرح RCGTEP پیشنهادی قادر است که با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی بهینه RSها، به‌طور همزمان شاخص‌های تاب آوری، پایداری استاتیکی، بهره‌برداری و اقتصادی را بهبود دهد.

5. منابع و مراجع

1. V. Asgharian, M. Abdelaziz, “A low-carbon market-based multi-area power system expansion planning model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 187, pp. 106500, 2020.
2. H. Arasteh, M. Kia, V. Vahidinasab, M. Shafie-khah, J.P.S. Catalão, “Multiobjective generation and transmission expansion planning of renewable dominated power systems using stochastic normalized normal constraint,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 121, pp. 106098, 2020.
3. M. Peker, A.S. Kocaman, B.Y. Kara, “A two-stage stochastic programming approach for reliability constrained power system expansion planning,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 103, pp. 458-469, 2018.

4. H. Nemati, M.A. Latify, G.R. Yousefi, "Coordinated generation and transmission expansion planning for a power system under physical deliberate attacks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96, pp. 208-221, 2018.
5. D.A. Tejada-Arango, G. Morales-España, S. Wogrin, E. Centeno, "Power-Based Generation Expansion Planning for Flexibility Requirements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 2012-2023, 2020.
6. P.V. Gomes, J.T. Saraiva, "A two-stage strategy for security-constrained AC dynamic transmission expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 180, pp. 106167, 2020.
7. S. Das, A. Verma, P.R. Bijwe, "Security constrained AC transmission network expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 172, pp. 277-289, 2019.
8. S.A. EghbaliKhob, M. Moazzami, R. Hemmati, "Advanced model for joint generation and transmission expansion planning including reactive power and security constraints of the network integrated with wind turbine" *Int Trans ElectrEnerg Syst*., vol. 29, pp. 1-20, 2019.
9. H. Hamidpour, J. Aghaei, S. Pirouzi, S. Dehghan, T. Niknam, "Flexible, reliable, and renewable power system resource expansion planning considering energy storage systems and demand response programs," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 11, pp. 1862-1872, 2019.
10. C. Shao, M. Shahidehpour, X. Wang, X. Wang, B. Wang, "Integrated Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Systems for Enhancing the Power Grid Resilience," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4418-4429, 2017.
11. K. Lai, M.S. Illindala, "Graph Theory Based Shipboard Power System Expansion Strategy for Enhanced Resilience," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5691-5699, 2018.
12. H. Hamidpour, J. Aghaei, S. Dehghan, S. Pirouzi, T. Niknam, "Integrated resource expansion planning of wind integrated power systems considering demand response programmes," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no.4, pp. 519-529, 2018.
13. S. Pirouzi, and J. Aghaei, T. Niknam, H. Farahmand, and M. Korpås, "Exploring prospective benefits of electric vehicles for optimal energy conditioning in distribution networks," *Energy*, vol. 157, pp. 679-689, 2018.
14. D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, "Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst*., vol. 28, no. 1, pp. 52-63, Feb. 2013.
15. S.M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, B. Mohammadi-Ivatloo, "Voltage stability constrained multi-objective optimal reactive power dispatch under load and wind power uncertainties: A stochastic approach," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 598-609, 2016.
16. J. Aghaei, N. Amjady, A. Baharvandi and M. Akbari, "Generation and Transmission Expansion Planning: MILP–Based Probabilistic Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1592-1601, July 2014.
17. IIT Power Group, 2003, Available at http://motor.ece.iit.edu/data/JEAS_IEEE118.doc.
18. S. Pirouzi, J. Aghaei, M.A. Latify, G.R. Yousefi, and G. Mokryani, "A robust optimization approach for active and reactive power management in smart distribution networks using electric vehicles," *IEEE System Journal*, pp. 1-12, 2017.

Generation and Transmission Expansion Planning Bound to the resilience of the transmission network against floods and earthquakes

Ehsan Akbari
Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran
e.akbari@ ustmb.ac.ir

Abstract— In this paper, the Resilience-Constrained Simultaneous Generation and Transmission Expansion Planning (RCGTEP) of the transmission network against natural disasters such as earthquakes and floods is presented. Therefore, the proposed scheme is modeled as a dual-objective problem, in which one objective function is to minimize the construction and operation costs of the resilient resources (RSs) and is considered, and in the other objective function, the expected energy not fed (EENS) due to the system outage against the aforementioned natural disasters will be formulated. Also, the proposed scheme is constrained by the AC optimal power distribution equations (AC-OPF), the planning and operation model of RSs such as generating units, robust transmission lines, series and parallel FACTS devices (SF and PF), and the resilience and angular stability constraints of the power system against earthquakes and floods in the presence of critical and non-critical loads. This strategy has uncertainty of RS availability under natural disaster conditions, so stochastic modeling will be adopted for RCGTEP. Finally, numerical results obtained by implementing the proposed strategy on IEEE standard transmission networks confirm the capabilities of this scheme in simultaneously improving economic indicators, utilization, angular stability and power system resilience.

Keywords: Development planning, floods and earthquakes, resilience resources, epsilon constraint, transmission network.