

## برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها با در نظر گرفتن کلیدزنی انتقال و ظرفیت دینامیکی خط

محمد یاسین دیوانی<sup>۱</sup>، مجتبی نجفی<sup>۲</sup>، امیر قائدی<sup>۳\*</sup>

۱- مربی، ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر ۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، داریون

(دریافت: ۹۸/۰۲/۲۴، پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۸)

### چکیده

در این مقاله یک مسئله امنیت مقید مشارکت واحدها یا همان (SCUC) چندهدفه بر اساس یک مدل پخش توان AC خطی با استفاده از کلیدزنی خطوط انتقال (TS) و با در نظر گرفتن ظرفیت دینامیکی خط پیشنهاد شده است. امروزه مسئله SCUC یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در بهره‌برداری بهینه و ایمن از بازارهای برق مدرن است. در اینجا ترم معادله تعادل گرما به‌عنوان یک قید امنیت شبکه با یک چهارچوب چندهدفه برای به کار بردن هم‌زمان دو تابع هدف شامل حداقل کردن هزینه بهره‌برداری کل و حداقل کردن انتشار آلاینده ارائه گردیده است. در این روش میزان هزینه بهره‌برداری در حالت دینامیک حرارتی خط (DTLR) نسبت به حالت استاتیکی خط (SLR) به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد برای نشان دادن کارایی این مدل، روش پیشنهادی بروی سیستم عباسه IEEE با استفاده از نرم‌افزار Gams پیاده‌سازی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** امنیت مقید مشارکت واحدها (SCUC)، کلیدزنی انتقال (TS)، میزان دینامیک حرارتی خط (DTLR)، پخش توان AC

## Security-Constrained Unit Commitment with Transmission Switching and Dynamic Line Rating

M. Y. Divani, M. Najafi, A. Ghaedi\*

Islamic Azad University, Bushehr

(Received: 14/05/2019; Accepted: 29/12/2019)

### Abstract

*In this paper, a multidisciplinary Security-Constrained Unit Commitment on a linear AC power flow model using Transmission Switching and Dynamic Line Rating (DLR). Today SCUC is one of the most important issues in the optimal and safe operation of modern electricity markets. This paper presents an improved linear AC power flow model using Transmission Switches (TS) and considering it as a network security constraint with a multi-objective framework for simultaneously applying two objective functions, including minimizing the total operating cost and Minimizing emission of pollutants is provided. Dynamics Thermal Line Rating (DTLR) (with climatic conditions) into the Security-Constrained Unit Commitment using Transmission Switching system, in addition to reducing the Switching and extending the life of the circuit-breaker reduces the cost of operation significantly. In this way, the cost of operating in the DTLR mode is significantly reduced compared to the SLR mode. In order to demonstrate the performance of this model, the proposed method is implemented on the 6- IEEE Bus system using the Gams software.*

**Keywords:** Security-Constrained Unit Commitment, Transmission Switching, Dynamic Line Rating, AC power flow

\*Corresponding Author E-mail: amir\_ghaedi\_63@yahoo.com

## ۱. مقدمه

واحد با یک معیار رزرو احتمالاتی استفاده شده است [۱]؛ همچنین در مطالعه‌ای دیگر برای محاسبه حالت‌های امن N-1 از روش کلیدزنی انتقال بهره برده‌اند [۲]. به‌منظور کاهش تجاوز توان عبوری خط و ولتاژ بیس از حد مجاز نیز، کلیدزنی انتقال در نظر گرفته شده است [۳]. همچنین یک مدل SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال با در نظر گرفتن نیروگاه بادی ارائه شده است. [۴]. یکی دیگر از راهکارهایی که باعث کاهش هزینه بهره‌برداری در سیستم قدرت می‌شود استفاده از DLR<sup>۵</sup> در مسائل SCUC است. به‌طور کلی در بهره‌برداری سیستم به‌منظور کاهش رزرو چرخان موردنیاز، قطع کردن بار و غیره، استفاده از DLR مورد مطالعه قرار گرفته شده است [۵]. دینامیک حرارتی خط بیشتر در موضوعاتی که در آن احتمال<sup>۶</sup> تعریف می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد بنابراین، در قیود امنیت قرار گرفتن واحدها (SCUC)، باید DLR تعریف شود. در تحقیقات اخیر یک مدل DLR برای افزایش سطح پتانسیل توان باد ارائه شده است و برای ارزیابی DLR روش‌های مختلفی ارائه گردیده که عبارت‌اند از:

- ۱- DLR با پیش‌بینی بار و پیش‌بینی آب‌وهوا
- ۲- تخمین DLR در اندازه‌گیری غیرمستقیم
- ۳- زمان واقعی ارزیابی DLR با استفاده از داده‌های هواشناسی [۶-۷].

همچنین در مطالعه‌ای که توسط پژوهشگران انجام گرفته، از ترم HBE مستقل از توان عبوری خطوط استفاده شده است. در این مقاله ترم معادله تعادل گرما (HBE) در مسئله SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال، به‌عنوان دینامیک حرارتی خط (DTLR) در نظر گرفته شده است که ترم معادله تعادل گرما (HBE) یک ترم غیرخطی است و به تبع آن، مسئله را پیچیده و روش حل را محدود می‌کند [۸]. در تحقیقی دیگر، یک روش تکه‌ای خطی، جهت خطی سازی تلفات انتقالی پیشنهاد شده است [۵]. یکی دیگر از چالش‌های اساسی سیستم‌های قدرت، حل مسئله SCUC توسط یک پخش توان AC خطی دقیق است که بتوان رفتار واقعی شبکه را به‌صورت دقیق مدل‌سازی کرد. در این خصوص یک مدل DC برای OPF<sup>۷</sup> ارائه شده است [۹] و از آنجایی که در مدل DC رفتار شبکه به‌صورت دقیق مدل‌سازی نمی‌شود، درجایی دیگر یک مدل AC برای OPF پیشنهاد شده است [۱۰].

یکی از روش‌های افزایش امنیت شبکه، استفاده از ابزارهای کارآمدی مانند کلیدزنی انتقال در حل مسائل برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدهای حرارتی یا همان (SCUC<sup>۱</sup>) است. کلیدزنی انتقال می‌تواند اقدامات کنترل انعطاف‌پذیری برای پایداری ولتاژ، مدیریت تراکم، کاهش تلفات و امنیت سیستم را فراهم سازد. محدودیت‌های توان عبوری خط در مسائل SCUC نقش مهمی در مدیریت اقتصادی و امنیتی در سیستم‌های قدرت دارد. در مسائل SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال<sup>۲</sup>، با کنترل توان عبوری خطوط، وضعیت ورود و خروج خطوط نیز کنترل می‌شود؛ و از آنجایی که توان عبوری خطوط باعث تولید گرما می‌شود و حرارت خط را افزایش می‌دهد، در مدل استاتیکی اجرای SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال در بدترین شرایط آب و هوایی و در ماکزیمم دمای خط انجام می‌شود که این امر باعث افزایش تلفات گرمایی خطوط و میزان تراکم خطوط انتقال افزایش می‌گردد و در نتیجه میزان کلیدزنی در سیستم قدرت جهت خارج کردن خطوط با تراکم زیاد (پرتراکم) افزایش یافته و در نهایت تولید ژنراتور و علاوه بر آن هزینه بهره‌برداری نیز افزایش خواهد یافت.

در این مقاله، در SCUC با کلیدزنی انتقال، دینامیک حرارتی خط<sup>۳</sup> (DTLR) به‌عنوان قید امنیت شبکه در نظر گرفته شده است. در این حالت، توان عبوری خط با در نظر گرفتن محدودیت دمای خط (معادله تعادل گرما (HBE)<sup>۴</sup>) کاهش می‌یابد و به علت کاهش تراکم خطوط، میزان کلیدزنی در سیستم‌های قدرت کاهش یافته و عملکرد کلیدزنی انتقال در سیستم‌های قدرت بهبود می‌گردد و در نتیجه این امر، هزینه بهره‌برداری به میزان قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت. همچنین در این مقاله، تلفات شبکه به‌صورت خطی در نظر گرفته شده و یک تقریب خطی برای خطی کردن تلفات گرمایی ناشی از توان عبوری خطوط در ترم معادله تعادل گرما (HBE) پیشنهاد شده است.

امروزه برای کاهش هزینه بهره‌برداری و درعین حال افزایش امنیت شبکه در مسائل SCUC راهکارهای مختلفی ارائه شده است که یکی از این راهکارها استفاده از کلیدزنی انتقال به‌عنوان قید امنیت در سیستم‌های قدرت است. در این روش با توجه به کلیدزنی خطوط انتقال در سیستم‌های قدرت، به پیدا کردن یک پخش توان بهینه برای واحدها با توجه به قیود شبکه می‌پردازد. در تحقیقات پیشین از ترکیب بهینه کلیدزنی انتقال در مشارکت

<sup>۵</sup> Dynamics Line Rating<sup>۶</sup> Contingency<sup>۱۰</sup> Optimal Power Flow<sup>۱</sup> Security-Constrained Unit Commitment<sup>۲</sup> Transmission Switching<sup>۳</sup> Dynamics Thermal Line Rating<sup>۴</sup> Heat-Balance Equation

(۳) تا (۶) می‌توان خطی نوشت. در این حالت دمای هادی از مجموعه دمای هر تکه به دست می‌آید.

$$q_r = 1.0178D\epsilon \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (۲)$$

$$q_{k,t}^r(T_{k,t}) = K_{k,t}^r \sum_j (a_{k,j,t} T_{k,t}^j + u_{k,j,t}^r b_{k,j,t}) \quad (۳)$$

$$\sum_j u_{k,j,t}^r = 1 \quad (۴)$$

$$u_{k,j,t}^r T_{k,j,t}^{r,\min} \leq T_{k,t}^j \leq u_{k,j,t}^r T_{k,j,t}^{r,\max} \quad (۵)$$

$$\sum_j T_{k,t}^j = T_{k,t} \quad (۶)$$

ترم تلفات حرارتی ناشی از توان عبوری خطوط (ql) بر حسب مقاومت حرارتی خط طبق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$q_{k,t}^l(T_{k,t}) = R(T_{k,t}) |I_{k,t}|^2 I_b^2 \quad (۷)$$

تلفات اهمی، یک رابطه غیرخطی و غیر محدب است که با در نظر گرفتن مقاومت حرارتی در بدترین شرایط (دمای ماکزیمم) این رابطه را می‌توان به رابطه محدب و نابرابر تبدیل کرد [۱۳].

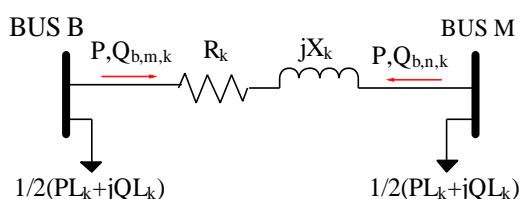
$$R_{k,t}(T_{k,t}) = R_{k,\text{ref}} \left( 1 + \alpha_k (T_{k,t} - T_{k,\text{ref}}) \right) \quad (۸)$$

$$q_{k,t}^l(T_{k,t}) \geq R_{k,t}(T_{\text{max}}) \left( |Q_{k,t}|^2 + |P_{k,t}|^2 \right) I_b^2 \quad (۹)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه (۷) یک رابطه غیرخطی است که باعث پیچیدگی حل مسئله SCUC می‌شود. از آنجایی که رابطه (۹) یک معادله دایره است پس می‌توان توسط یک چند ضلعی، معادله دایره را به یک تقریب خطی تبدیل کرد.

### ۲-۲. ساختار پخش توان AC خطی شده با در نظر گرفتن تلفات

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تلفات خط به‌عنوان بار در باس‌ها در نظر گرفته شده است و همچنین توان عبوری از خطوط به‌صورت زیر تعریف شده است [۱۴]:



شکل ۱. مدل خط انتقال با در نظر گرفتن تلفات

در این مقاله، یک مدل پخش توان AC خطی با استفاده از کلیدزنی انتقال و با در نظر گرفتن میزان دینامیک حرارتی خط، پیشنهاد شده است که بر اساس این مدل پیشنهادی، میزان کلیدزنی کاهش و به تبع میزان هزینه بهره‌برداری نسبت به حالت استاتیکی، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همچنین یک چهارچوب چندهدفه برای به کار بردن هم‌زمان دو تابع هدف شامل مینیمم کردن هزینه بهره‌برداری کل و مینیمم کردن انتشار ارائه شده است؛ همچنین در تحقیقات پیشین تأثیر گرمای خط در نظر گرفته نمی‌شد. این مقاله دارای نوآوری‌های زیر نسبت به کارهای پیشین است:

- ۱) در نظر گرفتن دینامیک خط
- ۲) در نظر گرفتن پخش بار کلیدزنی
- ۳) در نظر گرفتن منابع انرژی نو با مسئله چندهدفه مقاله پیش رو شامل بخش‌های زیر می‌باشد:
  - ۱- بررسی دینامیک حرارتی خط بر اساس معادله تعادل گرما HBE و نحوه خطی سازی تلفات گرمایی ناشی از توان عبوری خطوط.
  - ۲- ساختار پخش توان AC خطی شده با در نظر گرفتن تلفات.
  - ۳- ارائه روش بهینه‌سازی برای حل مسائل چندهدفه.
  - ۴- مدل مورد مطالعه.
  - ۵- نتایج مقایسه مدل دینامیکی پیشنهادی با مدل استاتیکی.

### ۲. روش تحقیق

#### ۲-۱. بررسی دینامیک حرارتی خط بر اساس معادله تعادل گرما (HBE)

معادله تعادل گرما از ترم‌های مختلفی تشکیل شده است که عبارت‌اند از [۱۱]:

- ۱- تلفات گرمایی ناشی از توان عبوری خطوط (ql)
- ۲- تلفات حرارتی ناشی از نور خورشید (qs)
- ۳- تلفات تابشی (qr) - تلفات انتقالی (qc)

معادله تعادل گرما (HBE) بر اساس تغییرات دمای هادی طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۲]:

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 R(T_c) \quad (۱)$$

ترم حرارتی تابشی خط (qr) بر اساس رابطه (۵) بر حسب دمای محیط و دمای هادی یک رابطه غیرخطی است که یک تقریب خطی تکه‌ای، برای ترم qr ارائه شده است [۱۳]. بر اساس شکل (۱) بهره حرارتی تابشی بر حسب دمای هادی (qr/T) معادله هر تکه‌ای از این نمودار بر اساس معادله خط طبق رابطه

همچنین حداقل رساندن قطعی بار و مینیمم کردن انتشار تشکیل شده است. در این مسئله در دسترس بودن هزینه تولید ژنراتورها، اعم از توان اکتیو و راکتیو و هزینه مربوط به ارائه رزرو جزء فرضیات در نظر گرفته شده است. هدف دوم از مدل چندهدفه پیشنهاد شده مربوط به انتشار است که به شرح زیر مینیمم می‌شود؛ که  $E_i(O)$  در آن آلاینده‌های مهم مانند دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) و اکسید نیتروژن ( $NO_x$ ) است. مضاف به این  $F_2$ ، به صورت  $kgMWh^{-1}$  بیان شده است و شامل انتشار تولید شده توسط  $FC$ ،  $PV$  و واحدهای باتری می‌شود. در نهایت، انتشار تولید شده به علت انتقال توان با شبکه برق در آخرین ترم معادله (۳۶) نشان داده شده است. رابطه (۲۵) و (۲۶) مربوط به محدودیت‌های توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور است که در آن  $u_{g,t}^s$  پارامتر مربوط به رخ داد احتمالی و  $u_{g,t}$  متغیر باینری مربوط به ورود و خروج ژنراتورها است.

قیود (۲۷-۳۰) محدودیت توان خروجی واحدهای  $PV$ ،  $FC$ ،  $WT$  و باتری را نشان می‌دهد. و همچنین به ازای هر سناریو میزان رزرو هر ژنراتور توسط  $\Delta r_{g,t}^s$  مشخص می‌شود. قیود مربوط به شیب ژنراتورها در رابطه (۳۱) و (۳۲) آورده شده و همچنین قیود مربوط به محدودیت‌های رزرو برای هر ژنراتور در (۳۳) مشخص شده است. قیود (۳۴) مربوط به توازن توان اکتیو همراه با در نظر گرفتن تلفات خط و میزان قطعی بار است و قیود مربوط به توازن توان راکتیو در رابطه (۳۵) مشخص می‌شود.

در (۳۶) و (۳۷) نحوه عملکرد کلیدزنی انتقال برای توان‌های اکتیو و راکتیو نشان می‌دهد.  $z_{k,t}^s$  پارامتر مربوط به رخداد احتمالی برای هر خط است و  $z_{k,t}$  تغییر باینری برای ورود و خروج خطوط بوده و  $m$  یک مقدار ثابت بزرگ است و  $P_{b,m,k,t}^s$  توان عبوری خطوط از  $m$ ام به شین  $m$ ام را نشان می‌دهد. در این حالت در صورتی که خط در مدار باشد مقدار  $z_{k,t}$  یک، و مقدار توان عبوری خطوط برابر  $P_{b,m,k,t}^s$  می‌شود در صورتی که تصمیم‌گیری بر این اساس باشد که خط از مدار خارج شود، مقدار  $z_{k,t}$  صفر، و توان عبوری خطوط بین دو مقدار بزرگ منفی و مثبت قرار می‌گیرد.

رابطه‌های (۳۸) و (۳۹) قیود مربوط به محدودیت‌های توان عبور خطوط را تعیین می‌کند و از آنجایی که در این پخش توان، تلفات خط در نظر گرفته شده، محدودیت‌های تلفات خط برای توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در روابط (۴۰)، (۴۱) و (۴۲)، (۴۳) مشخص گردیده است. و از طرفی دیگر در این پخش بار محدودیت‌های مربوط به زوایای شین‌ها و ولتاژ شین در نظر گرفته شده است که می‌توان طبق روابط (۴۴) تا (۴۸) تعریف کرد. قیود مربوط به تعادل گرما در خط طبق رابطه (۴۹-۵۰)

$$P_k = V_b^2 g_k - V_b V_m (g_k \cos \delta_k + b_k \sin \delta_k) \quad (10)$$

$$(b_k + b_{k0}) V_b V_m (b_k \cos \delta_k + g_k \sin \delta_k) \quad (11)$$

از آنجایی که روابط (۱۰) و (۱۱) غیرخطی است، می‌توان با تقریب‌های زیر یک روابط خطی تبدیل کرد:

$$\cos \delta_k = 1 \quad (12)$$

$$\sin \delta_k = \delta_k \quad (13)$$

بدیهی است اختلاف زوایا در شین‌ها خیلی کوچک است بر همین اساس می‌توان با تقریب خوب روابط مثلثاتی را حذف نمود.

همچنین دامنه ولتاژ باس‌ها با یک تغییرات خیلی کوچک، تقریباً برابر با ۱ پریونیت می‌توان در نظر گرفت.

$$V_b = 1 + \Delta V_b \quad (14)$$

از آنجایی که در این مدل تلفات خط به‌عنوان بار در شین‌ها مدل‌سازی شده، روابط مربوط به تلفات خط به شکل زیر پیشنهاد شده است [۱۴]:

$$PL_k \approx g_k \delta_k^2 \quad (15)$$

$$QL_k \approx b_k \delta_k^2 \quad (16)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود  $\delta_k^2$  باعث غیرخطی شدن روابط (۱۵) و (۱۶) شده که به‌عنوان یک روش خطی تکه‌ای برای خطی کردن تلفات استفاده گردیده است [۱۲].

$$\delta_k = \delta_k^+ - \delta_k^- \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L \Delta \delta_k(l) = |\delta_k| = \delta_k^+ - \delta_k^- \quad (18)$$

$$0 \leq \Delta \delta_k(l) \leq \frac{\delta_k^{\max}}{L} \quad (19)$$

$$\Delta \delta_k(l) \leq \Delta \delta_k(l-1) \quad (20)$$

$$k(l) = (2l-1) \frac{\delta_k^{\max}}{L} \quad (21)$$

$$\delta_k^2 = \sum_{l=1}^L k(l) \Delta \delta_k(l) \quad (22)$$

### ۳-۲. مدل پیشنهادی برای مسائل چندهدفه با استفاده از کلیدزنی انتقال (TS) و دینامیک حرارتی خط (DTLR)

در این مقاله از یک مدل مسائل چندهدفه با استفاده از کلیدزنی انتقال، همراه با ادغام DTLR به‌عنوان قیود امنیت پیشنهاد شده است تابع هدف مسئله همان‌طور که طبق رابطه (۲۳-۲۴) تعریف شده است از حداقل رساندن هزینه تولید ژنراتورها و

$$P_{b,m,k,t}^S - M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \leq P_{k,t}^S \leq P_{b,m,k,t}^S + M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \quad (36)$$

$$Q_{b,m,k,t}^S - M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \leq Q_{k,t}^S \leq Q_{b,m,k,t}^S + M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \quad (37)$$

$$-P_k^{max} \cdot z_{k,t} \cdot zC_k^S \leq P_{k,t}^S \leq P_k^{max} \cdot z_{k,t} \cdot zC_k^S \quad (38)$$

$$-S_k^{max} \cdot z_{k,t} \cdot zC_k^S \leq Q_{k,t}^S \leq S_k^{max} \cdot z_{k,t} \cdot zC_k^S \quad (39)$$

$$g_k \sum_{l=1}^L k(l)\Delta\delta_{k,t}^S(l) - M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \leq PL_{k,t}^S \leq g_k \sum_{l=1}^L k(l)\Delta\delta_{k,t}^S(l) + M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \quad (40)$$

$$0 \leq PL_{k,t}^S \leq z_{k,t} \cdot zC_k^S \cdot g_k (\delta_k^{max})^2 \quad (41)$$

$$-b_k \sum_{l=1}^L k(l)\Delta\delta_{k,t}^S(l) - M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \leq QL_{k,t}^S \leq -b_k \sum_{l=1}^L k(l)\Delta\delta_{k,t}^S(l) + M(1 - z_{k,t}zC_k^S) \quad (42)$$

$$0 \leq QL_{k,t}^S \leq -z_{k,t} \cdot zC_k^S \cdot b_k (\delta_k^{max})^2 \quad (43)$$

$$\delta_k^{min} \leq \delta_{k,t}^S \leq \delta_k^{max} \quad (44)$$

$$\Delta V^{min} \leq \Delta V_{b,t}^S \leq \Delta V^{max} \quad (45)$$

$$-\Delta SP_k^{max} - M(z_{k,t-1} - z_{k,t} + 1)zC_k^S \leq \delta_{k,t}^S \leq \Delta SP_k^{max} + M(z_{k,t-1} - z_{k,t} + 1)zC_k^S \quad (46)$$

$$\delta_{k,t}^{+S} - \delta_{k,t}^{-S} = \delta_{k,t}^S \quad (47)$$

$$\Delta V_{b,t}^{+S} - \Delta V_{b,t}^{-S} = \Delta V_{b,t}^S \quad (48)$$

تعریف شده که در این معادله میزان تغییرات زمان یک ساعته و همچنین سرعت باد پایین فرض شده است [۱۶].

$$MinZ^{down} = \sum_t \sum_g [C(P_{g,t}) + SU_{g,t} + SD_{g,t} + C\Delta r_{g,t}^S] \quad (23)$$

$$MinZ1^{down} = \sum_t \sum_g [E_i(g,t)(P_{g,t}) + E_i(f,t)(P_{f,t}) + E_i(p,t)(P_{p,t}) + E_i(b,t)(P_{b,t})] \quad (24)$$

$$P_g^{min} u_{g,t} uc_g^S \leq P_{g,t} + \Delta r_{g,t}^S \leq P_g^{max} u_{g,t} uc_g^S \quad (25)$$

$$Q_g^{min} u_{g,t} uc_g^S \leq Q_{g,t}^S \leq Q_g^{max} u_{g,t} uc_g^S \quad (26)$$

$$P_{Min}(f,t) * V(f,t) \leq P(f,t) \leq P_{Max}(f,t) * V(f,t) \quad (27)$$

$$PF_{Min}(p,t) * V(p,t) \leq P(p,t) \leq PF_{Max}(p,t) * V(p,t) \quad (28)$$

$$PF_{Min}(w,t) * V(w,t) \leq P(w,t) \leq PF_{Max}(w,t) * V(w,t) \quad (29)$$

$$P_{Min}(b,t) * V(b,t) \leq P(b,t) \leq P_{Max}(b,t) * V(b,t) \quad (30)$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq R_g^+ u_{g,t-1} + R_g^{SU} v_{g,t} \quad (31)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq R_g^+ u_{g,t} + R_g^{SU} w_{g,t} \quad (32)$$

$$-SR_g^+ \leq \Delta r_{g,t}^S \leq SR_g^+ \quad (33)$$

$$\sum_{\forall g(b)} (P_{g,t} + \Delta r_{g,t}^S) - \sum_{\forall k(b,m)} (P_{k,t}^S + 0.5PL_{k,t}^S) = PD_{b,t}^S \quad (34)$$

$$\sum_{\forall g(b)} Q_{g,t}^S + \sum_{\forall k(b,m)} (Q_{k,t}^S - 0.5QL_{k,t}^S) = QD_{b,t} \quad (35)$$

استفاده نشده است. این روش نسبت به بسیاری از روش‌های استفاده شده برای حل مسائل چندهدفه دارای مزایای بسیاری است؛ اما یک مسئله حیاتی در مورد روش NBI وجود دارد که باید بررسی شود و آن مسئله این است که میل به افراط تابع هدف در یک مجموعه مؤثر و کارآمد بهینه نشود. از این رو، برای روبه‌رو شدن با این نقطه ضعف در این مقاله از یک بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۵].

هنگام تهیه جدول بازپرداخت، باید تضمین شود که راه‌حل‌های به دست آمده از بهینه‌سازی فردی توابع هدف، همه راه‌حل‌های کارآمد پارتو هستند. در این راستا، در این مقاله از بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک برای ساخت جدول بازپرداخت استفاده شده است. اصل اساسی بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک برای بهینه‌سازی، اولین تابع هدف با وجود یکسری تابع هدف است. به طور کلی، بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک یک سری از توابع هدف برای بهینه کردن اولین تابع هدف است و سپس در میان گزینه‌های جایگزین مطلوب برای تابع هدف دوم و غیره بهینه‌سازی می‌کند. روند بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک می‌تواند به شرح زیر باشد:

در مرحله اول، اولین تابع هدف را بهینه‌سازی کنیم که در نتیجه  $\min f_1 = z_1^*$  است. پس از آن تابع هدف بعدی با قید  $f_1 = z_1^*$  بهینه‌سازی می‌شود؛ بنابراین، راه‌حل بهینه‌ای که در نظر گرفته شده  $\min f_2 = z_2^*$  با توجه به  $f_1 = z_1^*$  است. پس از آن سومین تابع هدف بهینه با قید  $f_1 = z_1^*$  و  $f_2 = z_2^*$  می‌تواند در نظر گرفت. تا وقتی که اولین ردیف از جدول بازپرداخت  $\Phi$  ساخته شود. با همان فرآیند، ردیف‌های دیگر جدول بازپرداخت تکمیل خواهد شد. برای مثال، هنگام تشکیل ردیف دوم جدول بازپرداخت، دومین تابع هدف بهینه یعنی  $\min f_2 = z_2^*$  است. سپس با در نظر گرفتن قید  $f_2 = z_2^*$  و غیره تابع هدف سوم بهینه می‌شود. اشاره شد که همه راه‌حل‌های به دست آمده از بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک همه غیر غالبی یا راه‌حل‌های کارآمد هستند [۱۵]. نحوه تشکیل جدول بازپرداخت در مقاله احمدی و همکاران [۱۶] گفته شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. مدل مورد مطالعه

در این بخش از مقاله، نتایج از حاصل پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه ۶ پایه برای یک دوره زمانی ۲۴ ساعته ارائه شده است و همچنین نتایج حاصل از مقایسه مدل SCUC

$$\begin{aligned} mC_{p_k}(T_{k,t+1,s} - T_{k,t,s}) \\ = \Delta t (q_{k,t,s}^l(T_{k,t,s}) \\ + q_{k,t,s}^s - q_{k,t,s}^c(T_{k,t,s}) \\ - q_{k,t,s}^r(T_{k,t,s})) \end{aligned} \quad (۴۹)$$

$$T_{k,t,s} \leq T_{max} \quad (۵۰)$$

#### ۴-۲. روش ریاضی بهینه‌سازی چندهدفه و روش‌شناسی راه‌حل

##### ۴-۲-۱. اصول بهینه‌سازی چندهدفه

هدف اصلی از اجرای مسئله بهینه‌سازی چندهدفه (همچنین، اجرای چندگانه، چند معیاری یا بردار بهینه‌سازی نامیده می‌شود) مینیمم یا ماکزیمم سازی چندین تابع هدف است. منظور از مسئله چندهدفه در چهارچوب برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه کردن توابع هدف مختلف است. در نتیجه، یک راه‌حل بهینه تکی طولانی‌تر وجود ندارد و در عوض مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیر غالب وجود خواهد داشت. عبارت ریاضی زیر یک مسئله بهینه‌سازی معمولی را نشان می‌دهد.

$$\min F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))^T \text{ s. t. } \{x \in R | g(x) \leq 0, h(x) = 0\} \quad (۵۱)$$

##### ۴-۲-۲. روش تقاطع مرزی نرمال

اولین مرحله در روش NBI ایجاد و ساخت جدول بازپرداخت  $\Phi$  است. معمولاً، مینیمم‌های فردی توابع هدف برای ایجاد یک جدول بازپرداخت برای یک مسئله دلخواه شامل  $m$  تابع هدف محاسبه می‌شوند. پس از آن، با راه‌حل بهینه‌سازی تابع هدف  $f_i(x)$ ، مینیمم مقدار  $f_i(x)$  حاصل شده از حل  $x_i^*$  به وسیله  $f_i^*(x_i^*)$  مشخص خواهد شد. مقادیر محاسبه شده توابع هدف دیگر به صورت زیر می‌توان نشان داد. عبارت زیر نشان‌دهنده ستون  $i$  ام از جدول بازپرداخت (نقاط پایه) است.

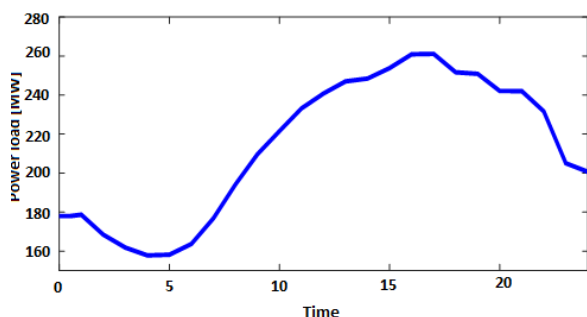
$$[f_1(x_i^*), \dots, f_{i-1}(x_i^*), f_{i+1}(x_i^*), \dots, f_m(x_i^*)]^T \quad (۵۲)$$

که در آن:

$$x_i^* = \arg \min f_i \text{ s. t. } \{x \in R | g(x) \leq 0, h(x) = 0\} \quad (۵۳)$$

روش NBI برای محاسبه عددی نقاط نسبتاً توزیع شده درون مسائل بهینه‌سازی پارتو چندهدفه روبه‌جلو، یک روش پیشنهاد شده کارآمد است. تاکنون برای حل مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت اقتصادی/زیست‌محیطی یک میکرو گرید از روش NBI

<sup>۱</sup>lexicographic



شکل ۳. میزان بار سیستم ۶ باسه

جدول ۱. داده‌های خط انتقال در یک سیستم ۶ باسه

Line number	From bus	To bus	Xl,pu	Rl,pu	Maximum Line Flow MW
۱	۱	۲	۰/۱۷	۰/۰۰۵	۱۵۰
۲	۲	۴	۰/۲۵۸	۰/۰۰۳	۱۵۰
۳	۲	۳	۰/۰۳۷	۰/۰۲۲	۱۵۰
۴	۲	۴	۰/۱۹۷	۰/۰۰۷	۱۵۰
۵	۳	۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۵	۱۵۰
۶	۴	۵	۰/۰۳۷	۰/۰۰۲	۳۷
۷	۵	۶	۰/۱۴	۰/۰۰۲	۱۵۰

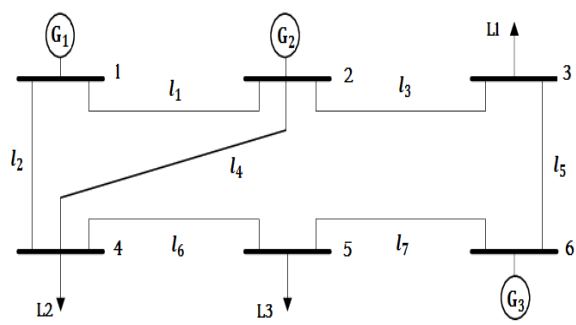
جدول ۲. داده‌های واحدهای تولیدی در یک سیستم ۶ باسه

Units	Energy bid price, \$/MWh	Ramp up/down rate (MW/h)	Start-up/Shutdown Cost(\$)	$P_{max}$ (MW)	$P_{min}$ (MW)	$Q_{max}$ (MW)	$Q_{min}$ (MW)	Minimum up(h)	Minimum down (h)
G1	۲۰	۵۵	۱۰/۱۰۰	۲۲۰	۱۰۰	۲۰۰	-۸۰	۴	۴
G2	۲۳	۵۰	۲۰/۱۰۰	۲۰۰	۱۰	۷۰	-۴۰	۳	۲
G3	۳۵	۲۰	۲۰/۱۰۰	۵۰	۱۰	۵۰	-۴۰	۱	۱

ارائه شده با استفاده از کلیدزنی انتقال با در نظر گرفتن میزان دینامیک حرارتی خط، با مدل SCUC در حالت استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله، برای مدل‌سازی مدل مورد نظر از نرم‌افزار GAMS استفاده شده [۱۷]؛ و داده‌های ورودی سیستم و همچنین مشخصات شبکه مورد مطالعه در بخش بعد ارائه گردیده است.

### ۳-۲. داده‌های ورودی مدل مورد مطالعه:

شبکه ۶ باسه مورد آزمایش در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است و از سه واحد تولیدی، سه بار و هفت خط انتقال تشکیل شده است. محدودیت‌های توان تولیدی ژنراتورها و میزان بار کل در شکل (۳) و مشخصات خطوط در جدول (۱) و (۲) آورده شده است. بارهای اول و دوم و سوم به ترتیب ۲۰٪، ۴۰٪ و ۴۰٪ از بار کل و با ماکزیمم دمای هادی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین دمای محیط خطوط ۱ و ۲ باهم برابر و خطوط ۳ و ۵، سه درجه نسبت به خطوط ۱ و ۲ افزایش و دمای محیط خطوط ۴، ۶ و ۷ سه درجه سردتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. سیستم ۶ باسه مورد آزمایش

جدول ۳. مقایسه وضعیت کلیدزنی خطوط در حالت DTLR و SLR، در شرایط با سناریو (از مدار خارج شدن ژنراتور ۳ و خط ۷)

position	Line	Number of switching	Time																							
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
SLR	۲-۴	۹	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
	۴-۵	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DTLR	۲-۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۴-۵	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

خط ۷ ارائه می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن دینامیک حرارتی خط در SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال، می‌توان میزان تلفات حرارتی خطوط را به نحوی کاهش داد که دمای خط در محدوده مجاز قرار گیرد. همچنین با کاهش تلفات خطوط، میزان توان عبوری خطوط و در نتیجه میزان تراکم خطوط به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با کاهش تراکم خطوط، عملکرد کلیدزنی بهبود یافته و در نتیجه میزان کلیدزنی در خطوط انتقال کاهش می‌یابد و این در نتیجه میزان کلیدزنی در خطوط انتقال کاهش می‌یابد، این کاهش کلیدزنی باعث افزایش طول عمر کلیدهای قدرت در شبکه می‌شود؛ که این امر کمک زیادی به افزایش امنیت شبکه از نظر فنی می‌کند.

علاوه بر این، در حالت DTLR در هر دوره زمانی با توجه به شرایط آب و هوایی همان دوره زمانی اجرا می‌شود و این بدین معنی است که نسبت به حالت استاتیکی که در بدترین شرایط SCUC اجرا می‌شود تصمیم‌گیری درباره امنیت شبکه به‌طور دقیق گرفته می‌شود.

در جدول (۵) میزان هزینه بهره‌برداری و همچنین میزان انتشار ارائه شده است، در جدول (۷) توان تولیدی ژنراتور و در جدول (۸) توان تولیدی توربین بادی و سلول خورشیدی نشان می‌دهد. در جدول (۹) میزان دمای خط برای تمامی خطوط شبکه آورده شده است.

جدول ۵. حل پارتو برای مدل پیشنهادی در حالت DTLR

Emission (kg)	Cost (\$)
۱۸۸۳۶/۷۳۷	۴۱۴۶/۸۳
۱۸۹۴۲/۵۲	۴۰۰۲
۱۹۲۳۵	۳۸۵۶
۱۹۹۵۲/۳۹۵	۳۵۲۱
۲۰۱۴۵	۳۰۰۲/۷

جدول ۶. هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار در حالت DTLR

Optimization Method	Proposed
Total cost (\$/h)	۱۸۹۳۶/۵۴
Net emission (kg/h)	۴۱۰۶
CPU time (s)	۰/۳۶۰

### ۳-۳. نتایج مدل مسئله چندهدفه با استفاده از کلیدزنی

#### انتقال در حالت SLR

بدیهی است که استفاده از کلیدزنی در مسائل SCUC هزینه بهره‌برداری را به میزان چشم‌گیری کاهش می‌دهد، همان‌طور که گفته شد عملکرد کلیدزنی انتقال به‌گونه‌ای انجام می‌پذیرد که خطوطی که دارای تراکم زیاد هستند را از مدار خارج می‌کند که این عمل باعث کاهش تولید ژنراتورها و در نتیجه کاهش هزینه بهره‌برداری می‌شود. نتایج حاصل از مدل SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال در جدول (۴) نشان داده شده است. کلیدزنی در حالت استاتیکی SCUC در بدترین شرایط اجرا می‌شود این امر باعث افزایش تلفات گرمایی و همچنین افزایش توان عبوری خطوط شده و در نتیجه توان ژنراتورها و هزینه بهره‌برداری را افزایش می‌دهد و از طرفی افزایش توان عبوری خطوط، باعث افزایش کلیدزنی در خطوط می‌شود.

جدول ۴. هزینه بهره‌برداری در حالت SLR

Optimization Method	Proposed
Total cost (\$/h)	۲۱۹۶۳/۷۰۳
CPU time (s)	۰/۴۸۶

### ۴-۳. نتایج مدل مسئله چندهدفه با استفاده از کلیدزنی

#### انتقال در حالت DTLR و مقایسه آن با SLR

یکی از چالش‌هایی که در مسائل SCUC با استفاده از کلیدزنی انتقال می‌توان به آن اشاره کرد تعداد کلیدزنی در شبکه است، در صورتی که میزان کلیدزنی در شبکه از حدی افزایش یابد مشکلات زیادی از جمله خراب شدن کلید در طول زمانی کوتاه و... ایجاد می‌شود که این مشکلات به نحوی باعث افزایش هزینه بهره‌برداری می‌گردد. یکی از راهکارهایی که می‌توان به آن اشاره کرد محدود کردن تعداد کلیدزنی با استفاده از کم کردن میزان توان عبوری (کاهش تلفات) است.

مدل پیشنهاد شده در این مقاله با در نظر گرفتن DTLR، تلفات گرمایی خطوط کاهش و در نتیجه میزان کلیدزنی نیز به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد و علاوه بر این، کاهش میزان تولید ژنراتورها و هزینه بهره‌برداری را به دنبال دارد. در جداول (۳-۸) نتایج حاصل از مدل مسئله چندهدفه با استفاده از کلیدزنی انتقال با در نظر گرفتن DTLR نشان داده شده است. جدول (۳) نحوه کلیدزنی خطوط (۴-۲) و (۴-۵) برای حالت DTLR و SLR برای سناریو از مدار خارج شدن ژنراتور ۳ و



جدول ۸. توان تولیدی PV&WT در حالت DTLR

Time	load	WT	PV
۱	۱/۷۸	.	.
۲	۱/۶۸	.	۰/۲۲۸
۳	۱/۶۱	۰/۰۳۸	۰/۲۱۵
۴	۱/۵۷	.	۰/۲۰۷
۵	۱/۵۸	.	۰/۲۰۸
۶	۱/۶۳	.	۰/۲۱۹
۷	۱/۷۶	.	.
۸	۱/۹۴	.	.
۹	۲/۰۹	۰/۳۳۳	.
۱۰	۲/۲۱	.	.
۱۱	۲/۳۳	.	.
۱۲	۲/۴۰	.	.
۱۳	۲/۴۷	.	.
۱۴	۲/۴۸	.	.
۱۵	۲/۵۳	.	.
۱۶	۲/۶۰	.	.
۱۷	۲/۶۱	.	.
۱۸	۲/۵۱	.	.
۱۹	۲/۵۰	.	.
۲۰	۲/۴۲	.	.
۲۱	۲/۴۲	.	.
۲۲	۲/۳۱	.	.
۲۳	۲/۰۵	.	.
۲۴	۲/۰۰	.	.

جدول ۷. توان تولیدی ژنراتورها در حالت DTLR

Time	G1	G2	G3
۱	.	۰/۱۰۰	.
۲	.	۰/۱۰۰	.
۳	.	۰/۱۰۰	.
۴	.	۰/۱۰۰	.
۵	.	۰/۱۰۰	.
۶	.	۰/۱۰۰	.
۷	.	۰/۱۰۰	.
۸	.	۰/۱۰۰	.
۹	.	۰/۱۰۰	.
۱۰	۰/۱	۰/۱۰۰	.
۱۱	۱	۰/۱۰۰	.
۱۲	۰/۱	۰/۱۰۰	.
۱۳	۱	۰/۱۰۰	.
۱۴	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱۵	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱۶	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱۷	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱۸	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۱۹	.	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰
۲۰	.	۰/۱۰۰	.
۲۱	.	۰/۱۰۰	.
۲۲	.	۰/۱۰۰	.
۲۳	.	۰/۱۰۰	.
۲۴	.	۰/۱۰۰	.

جدول ۹. دمای خطوط (°C) در حالت DTLR

Time	Line						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
۱	۲۴/۰۰۰	۲۴/۰۰۰	۲۷/۰۰۰	۱۹/۰۰۰	۲۷/۰۰۰	۱۹/۰۰۰	۵۱/۸۵۰
۲	۲۵/۳۴۴	۲۵/۷۶۰	۲۸/۳۷۷	۱۸/۹۸۶	۲۷/۷۵۸	۱۹/۶۱۳	۱۹/۷۵۷
۳	۲۶/۶۰۳	۲۷/۴۳۸	۲۹/۵۹۱	۱۸/۹۶۳	۲۸/۴۶۴	۲۰/۲۰۷	۲۰/۴۶۲
۴	۲۷/۷۹۸	۲۹/۰۴۸	۳۰/۷۸۰	۱۸/۹۳۱	۲۹/۱۳۰	۲۰/۷۸۱	۲۱/۱۲۶
۵	۲۸/۹۸۳	۳۰/۶۴۳	۳۱/۹۵۹	۱۸/۹۰۱	۲۹/۷۹۱	۲۱/۳۵۰	۲۱/۷۸۶
۶	۳۰/۲۱۸	۳۲/۲۷۷	۳۳/۱۸۸	۵۱/۸۵۰	۳۰/۴۸۸	۲۱/۹۳۰	۲۲/۴۸۳
۷	۳۱/۵۸۲	۳۴/۰۲۰	۳۴/۵۳۲	۵۱/۸۵۰	۳۱/۲۵۸	۲۲/۵۳۷	۲۳/۲۶۵
۸	۳۲/۰۱۵	۵۱/۸۵۰	۳۵/۹۱۳	۵۱/۸۵۰	۳۲/۰۲۲	۲۳/۱۶۹	۲۴/۱۴۸
۹	۳۴/۷۰۵	۵۳/۶۸۱	۳۷/۵۹۷	۵۱/۸۵۰	۳۳/۰۲۸	۲۳/۸۹۴	۲۵/۱۵۰
۱۰	۳۶/۳۰۷	۵۵/۷۴۴	۳۹/۱۹۲	۵۱/۸۵۰	۳۴/۰۰۰	۲۴/۵۵۴	۲۶/۳۹۱
۱۱	۳۸/۲۲۰	۵۷/۹۴۴	۴۱/۱۷۱	۸۱/۸۵۰	۳۵/۱۹۵	۲۶/۰۰۰	۲۷/۵۸۲
۱۲	۵۱/۸۵۰	۶۰/۰۴۲	۴۳/۱۹۶	۸۱/۸۵۰	۳۶/۴۵۰	۲۶/۷۳۴	۲۸/۸۲۹
۱۳	۵۲/۴۵۳	۸۱/۸۵۰	۴۵/۲۳۱	۸۱/۸۵۰	۳۷/۷۲۲	۲۷/۴۴۲	۳۰/۰۹۳
۱۴	۵۵/۲۱۴	۸۴/۰۰۳	۴۷/۳۵۷	۸۱/۸۵۰	۳۹/۰۲۲	۲۸/۱۴۷	۳۱/۳۸۸
۱۵	۵۶/۹۲۳	۸۶/۱۶۶	۴۹/۵۲۵	۸۱/۸۵۰	۴۰/۳۵۰	۲۸/۸۳۴	۳۲/۷۱۰
۱۶	۸۱/۸۵۰	۸۸/۳۴۴	۵۱/۷۵۳	۸۱/۸۵۰	۴۱/۷۱۷	۲۹/۴۹۷	۳۴/۰۷۱
۱۷	۸۳/۲۶۱	۹۰/۴۰۵	۸۱/۸۵۰	۸۱/۸۵۰	۴۳/۰۴۹	۳۰/۱۳۶	۳۵/۳۹۷
۱۸	۸۴/۴۷۵	۹۲/۱۲۰	۸۳/۴۷۴	۱۰۰/۰۰۰	۴۴/۲۲۰	۳۰/۷۲۶	۳۶/۵۶۱
۱۹	۸۵/۵۹۲	۹۳/۷۱۱	۸۴/۹۸۶	۱۰۰/۰۰۰	۴۵/۳۴۶	۳۱/۲۹۴	۳۷/۶۸۰
۲۰	۸۶/۷۳۰	۹۵/۲۱۵	۸۶/۳۶۱	۱۰۰/۰۰۰	۴۶/۳۷۱	۳۱/۸۴۷	۳۸/۶۹۷
۲۱	۸۷/۷۸۷	۹۶/۶۲۱	۸۷/۶۵۵	۱۰۰/۰۰۰	۴۷/۳۷۲	۳۲/۳۹۰	۳۹/۶۹۰
۲۲	۸۸/۷۸۶	۹۷/۸۶۹	۸۸/۷۵۱	۱۰۰/۰۰۰	۸۱/۸۵۰	۳۲/۸۹۵	۴۰/۵۳۸
۲۳	۸۹/۶۴۳	۹۸/۹۴۷	۸۹/۶۱۷	۱۰۰/۰۰۰	۸۲/۱۰۶	۳۳/۳۸۷	۴۱/۲۴۱
۲۴	۱۰۰/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰	۵۱/۸۵۰	۵۱/۸۵۰

$a_{k,j,t}, b_{k,j,t}$  ضرایب مربوط به تکه‌ای خطی تلفات تابشی  
 به ترتیب دمای هر تکه‌ای خطی و متغیر باینتری  
 $T_{k,t}^j, u_{k,j,t}^r$  مربوط به تلفات تابشی  
 $Z^{down}$  تابع هدف مسئله  
 $P(*, t)$  توان تولیدی واحد در ساعت  $t$   
 $V(*, t)$  متغیر باینتری که در صورت فعال بودن واحد در ساعت  $t$  برابر با یک است

**ثابت‌ها:**

$R_g^+, SR_g^+$  میزان تغییرات توان تولیدی ژنراتور و محدودیت رزرو در هر ژنراتور  
 $P_g^{max}, P_g^{min}, Q_g^{max}, Q_g^{min}, P_k^{max}, Q_k^{max}$  محدودیت توان اکتیو و راکتیو برای ژنراتور ها و خطوط  
 $\Delta V^{max}, \Delta V^{min}, \delta_k^{max}, \delta_k^{min}$  محدودیت‌های ولتاژ شین‌ها و اختلاف زاویه در هر خط  
 $E_i(*, t)$  ضریب انتشار  $i$  ام نوع انتشار ( $CO_2, SO_2$  و  $NO_x$ ) واحد در ساعت  $t$   
 $M$  یک مقدار مثبت بزرگ  
 $I_b$  جریان مرجع  
 $SU_{g,t}, SD_{g,t}$  هزینه مربوط به روشن و خاموش کردن ژنراتور ها  
 $zc_k^s, uc_g^s$  پارامترهای مربوط به رخداد خطا در واحد های تولیدی و خطوط انتقال

**۵. مرجع‌ها**

[1] Valarezc, O.M.; Wang, M.; Memon, R.A. "Incorporating Optimal Transmission Switching in Unit Commitment with a Probabilistic Spinning Reserve Criterion"; IEEE PES. General Meeting Conf. Beijing, China. 2018, 1-6.  
 [2] Zhang, H.; Cheng, H.; Zhang, J.; Lu, J.; Li, C. "Stochastic Optimal Transmission Switching Considering N-1 Security Constraints"; IEEE PES General Meeting Conf. Portland, USA. 2018, 1-5.  
 [3] Qiu, F.; Wang, J. "Chance-Constrained Transmission Switching with Guaranteed Wind Power Utilization"; IEEE Trans. Power Syst. 2014, 30, 1270-1278.  
 [4] Mittal, H.; Saraswat, M. "An Automatic Nuclei Segmentation Method Using Intelligent Gravitational Search Algorithm Based Superpixel Clustering"; Swarm Evol. Comput. 2019, 45, 15-32.  
 [5] Liu, Y.; Yu, S.; Zhu, Y.; Wang, D.; Liu, J. "Modeling, Planning, Application and Management of Energy Systems for Isolated Areas: A Review"; Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 82, 460-470.  
 [6] Kajela, D.; Manshahia, M. S. "Optimization of Renewable Energy Systems: A Review"; 2017.  
 [7] Kusiak, A.; Verma, A.; Wei, X. "Wind Turbine Frontier from SCADA"; Wind Syst. Magn. 2012, 3, 36-39.

در نتیجه همان‌طور که در جدول (۱۰) نشان داده شده است هزینه بهره‌برداری در حالت DTLR نسبت به حالت استاتیکی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

**جدول ۱۰.** مقایسه هزینه واحدها در حالت DTLR,SLR در سیستم ۶ باسه

Generation units scheduling cost[\$]	
SLR	۲۱۹۶۳/۷۰۳
DTLR	۱۸۸۳۶/۷۳۷

**۴. نتیجه‌گیری**

در این مقاله یک مسئله SCUC چندهدفه با حضور منابع تولید پراکنده در نظر گرفتن DTLR ارائه و باحالت SLR مقایسه گردیده است. همچنین برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه از نظر فنی/اقتصادی، از ابزار کارآمدی مانند کلیدزنی خطوط استفاده شده است. با توجه به اینکه یکی از چالش‌های مدل SCUC با استفاده از TS میزان زیاد کلیدزنی در شبکه است و این افزایش کلیدزنی در خطوط باعث کاهش طول عمر کلیدهای قدرت می‌شود در این تحقیق با در نظر گرفتن میزان دینامیک حرارتی خط در مسائل SCUC از افزایش تراکم خطوط جلوگیری شده که در این راستا با کاهش تراکم خطوط، عملکرد کلیدزنی بهبود و در نتیجه میزان آن در شبکه کاهش یافته است و این امر سبب افزایش طول عمر شبکه و کاهش هزینه‌ها شده است. علاوه براین، در حالت DTLR میزان هزینه بهره‌برداری نسبت به حالت SLR به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. قبل از این، برای برنامه‌ریزی این‌گونه شبکه‌ها تأثیر گرمای خط در نظر گرفته نمی‌شد و برنامه‌ریزی بر اساس دمای ماکزیمم خط صورت می‌پذیرفت. نتایج به‌دست آمده گویای برتری این روش نسبت به روش‌های دیگر است. مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه ۶ باسه IEEE در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته با استفاده از نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و آزمایش شده است.

**فهرست علائم**

**اندیس‌ها**

$t, s$  اندیس‌های مربوط به زمان و سناریو  
 $j, r$  اندیس‌های مربوط به تکه‌ای خطی تلفات تابشی  
 $g, b, p$  اندیس‌های مربوط به شبکه، باتری، فتوولتائیک

**متغیرها:**

$q_{k,t}$  تلفات اهمی  
 $dT_c, T_{k,t,s}$  به ترتیب تغییرات دمای خط و دمای خط  
 $R(T_c)$  مقاومت حرارتی  
 $K_{k,t}^r$  ضریب تلفات تابشی

- [14] Nikoobakht, A.; Mardaneh, M.; Aghaei, J.; Guerrero-Mestre, V.; Contreras, J. "Flexible Power System Operation Accommodating Uncertain Wind Power Generation Using Transmission Topology Control: An Improved Linearised AC SCUC Model"; IET Gener. Transm. Distrib. 2017, 11, 142-153.
- [15] Soroush, M.; Fuller, J. D. "Accuracies of Optimal Transmission Switching Heuristics Based on DCOPF and ACOPF"; IEEE Trans. Power Syst. 2013, 29, 924-932.
- [16] Ahmadi, A.; Ahmadi, M. R.; EsmaelNezhad, A. "A Lexicographic Optimization and Augmented  $\epsilon$ -constraint Technique for Short-Term Environmental/Economic Combined Heat and Power Scheduling"; Elec. Power Compon. Syst. 2014, 42, 945-958.
- [17] Izadbakhsh, M.; Gandomkar, M.; Rezvani, A.; Ahmadi, A. "Short-Term Resource Scheduling of a Renewable Energy Based Micro-Grid"; Renew. Energy 2015, 75, 598-606.
- [18] Nick, M.; Alizadeh, O.; Cherkaoui, R.; Paolone, M. "Security Constrained Unit Commitment with Dynamic Thermal Line Rating"; IEEE Trans. Power Syst. 2015, 29, 1-12.
- [8] Rezvani, A.; Gandomkar, M.; Izadbakhsh, M.; Ahmadi, A. "Environmental/Economic Scheduling of a Micro-Grid with Renewable Energy Resources"; J. Clean. Prod. 2015, 87, 216-226.
- [9] Wallnerström, C.J.; Huang, Y.; Söder, L. "Impact from Dynamic Line Rating on Wind Power Integration"; IEEE Trans. Smart Grid 2014, 6, 343-350.
- [10] Zhao, B.; Zhang, X.; Li, P.; Wang, K.; Xue, M.; Wang, C. "Optimal Sizing, Operating Strategy and Operational Experience of a Stand-Alone Microgrid on Dongfushan Island"; Appl. Energy 2014, 113, 1656-1666.
- [11] Hemmati, M.; Amjady, N.; Ehsan, M. "System Modeling and Optimization for Islanded Micro-Grid Using Multi-Cross Learning-Based Chaotic Differential Evolution Algorithm"; Int. J. Elec. Power. 2014, 56, 349-360.
- [12] Baker, G.; Davis, C.; Temple, B. "Mitigating Overhead Conductor Temperature Risk with Engineered Surface Coatings"; IEEE T&D Conf. Denver Co. 2018, 1-9.
- [13] Coffrin, C.; Van Hentenryck, P. "A Linear-Programming Approximation of AC Power Flows"; Inform. J. Comput. 2014, 26, 718-734.