

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

# کاهش هزینه انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط و قیود پخش بار AC

میلاذ شیرازی، میثم جعفری نوکندی، سید مهدی حسینی، تقی بارفروشی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بابل، ایران

چکیده — در این مقاله از کلیدزنی بهینه خطوط<sup>۱</sup> (OTS) به عنوان یک ابزار مدیریت پرشدگی خطوط و کاهش هزینه‌های انرژی و ذخیره چرخان و قطع بار سیستم استفاده شده است. این مسئله با در نظر گرفتن قیود AC و به دلیل حضور متغیر باینری که وضعیت در مدار قرار گرفتن خطوط را تعیین می‌کند یک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح<sup>۲</sup> (MINLP) است، که حل‌کننده مناسبی که جواب آن حتماً بهینه سراسری باشد، برای حل آن موجود نیست. همچنین به دلیل پیچیدگی‌های مسئله، زمان حل نیز زیاد است. لذا باید از روش‌های ابتکاری برای پیش‌بینی بهترین خطوط استفاده شود. به همین منظور در مقاله حاضر راه‌کاری که منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر خطوط بهینه برای خروج از شبکه، می‌گردد، ارائه شده و بر روی سیستم استاندارد ۵۷ باسه IEEE تست شده است. نتایج حاکی از آن است که با باز کردن تعداد محدودی از خطوط مناسب، می‌توان علاوه بر کاهش هزینه انرژی و ذخیره چرخان، قطع بار شبکه را نیز کاهش داد.

واژه‌های کلیدی — کلیدزنی بهینه خطوط انتقال، کاهش هزینه انرژی و ذخیره چرخان، برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح

## ۱. مقدمه

کلیدزنی خطوط انتقال در گذشته به عنوان راه‌کاری برای رفع اضافه بار خطوط [۱ و ۲]، حداقل کردن تلفات [۳] و یا برای رفع اضافه ولتاژهای شبکه [۴ و ۵] استفاده شده است، اما در سال‌های اخیر از کلیدزنی خطوط

<sup>1</sup> Optimal Transmission Switching

<sup>2</sup> Mixed-Integer Nonlinear Programming

<sup>3</sup> Mixed-Integer Linear Programming

یک روش ابتکاری که در [۱۴] ارائه شده است، خطوطی که متغیر باینری متناظر با وضعیت در مدار بودن آن‌ها باید صفر شود، به‌طور جداگانه پیش‌بینی شده و لذا مسئله بهینه‌سازی، فقط به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌شود که حل آن ساده‌تر است.

ساختار مقاله حاضر در ادامه به‌صورت زیر است. در بخش دوم فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط و قیود پخش بار AC ارائه شده است. در بخش سوم روش ابتکاری اصلاح شده برای انتخاب خطوط بهینه، شرح داده شده است. در بخش چهارم مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار GAMS بر روی سیستم استاندارد ۵۷ باسه شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی شده است. در نهایت در بخش پنجم به‌طور خلاصه از مقاله نتیجه‌گیری شده است.

## 2. فرمول بندی مسأله برنامه‌ریزی انرژی و

### ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی

#### خطوط و قیود پخش بار AC

تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی، حداقل کردن کل هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تأمین انرژی و ذخیره های چرخان افزایشی و کاهشی و خسارت احتمالی قطع بار است. از ذخیره های چرخان و قطع بار برای حفظ شرایط بهره‌برداری ایمن شبکه یعنی حفظ ولتاژ باس‌ها و توان خطوط در محدوده مجاز در زمان وقوع پیشامدهای احتمالی استفاده می‌شود. قیود موجود در حل این مسئله، آن را تبدیل به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با متغیرهای باینری می‌کند.

پیشامدهای احتمالی در نظر گرفته شده در این مقاله، خرابی یا خروج پیش‌بینی نشده ی هر یک از ژنراتورها و خطوط سیستم هستند. برای مدل‌سازی خروج هر عنصر  $i$  شبکه (خط یا ژنراتور) در پیشامد احتمالی  $c$  پارامتر باینری  $N_{i,c}$  تعریف می‌شود.  $N_{k,c} = 0$  خروج خط  $k$  و  $N_{g,c} = 0$  خروج ژنراتور  $g$  را بیان می‌کند. به ازای  $c=0$  که حالت عادی سیستم را نشان می‌دهد همه ژنراتورها در مدار بوده و لذا  $N_{g,0} = 1$  است. همچنین برای خطوطی که در حالت عادی باز می‌شوند  $N_{k,0} = 0$  و  $N_{k,c} = 0$  بوده و برای سایر خطوط باقیمانده در مدار،  $N_{k,0} = 1$  است.

تابع هدف مسئله مورد نظر به‌صورت زیر است:

$$\min \sum_g C_g P_{g,0} + C_g^u r_g^u + C_g^d r_g^d + VOLL \sum_{m,c} Pr_c \text{delp}_{m,c} \quad (1)$$

نسبت به قیود زیر:

کننده‌ای که این مسئله را به‌طور بهینه حل کند وجود ندارد. برای حل این مشکل در [۱۱] با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز، ابتدا مسئله DCOTS حل شده و اگر جواب آن، قیود پخش بار AC و محدودیت ولتاژ باس‌ها را برآورده کند به عنوان جواب شل‌دنی پذیرفته می‌شود؛ اما با توجه به تعیین خطوط اولیه توسط مسئله DC-OTS ممکن است همچنان بهینه‌ترین خطوط تعیین نگردند.

مشکل دیگری که در حل مسئله کلیدزنی خطوط وجود دارد، ابعاد بزرگ مسئله بهینه‌سازی ناشی از تعداد زیاد متغیرهای باینری است که حل مسئله را حتی در حالت خطی و با محاسبات پخش بار DC زمان‌بر می‌سازد. از این‌رو، روش‌هایی ارائه شده‌اند که خطوط کاندیدا برای کلیدزنی را با استفاده از محاسبات ساده‌تر که آمیخته با عدد صحیح نیستند به تعداد کمی از خطوط محدود می‌کنند [۱۲-۱۴]. مرجع [۱۴] روش ابتکاری بر مبنای خروج خطوط به‌صورت یکی پس از دیگری که در [۱۲] ارائه شده است را برای سیستم AC توسعه داده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش هم پایداری ولتاژ سیستم را تضمین می‌کند و هم باعث کاهش هزینه کل سیستم در مدت زمان محاسباتی قابل قبول می‌گردد. با این‌وجود این روش در برخی موارد قادر به تشخیص بهینه‌ترین خط جهت باز شدن در هر مرحله نیست. لذا در مقاله‌ی حاضر، با اصلاح روش ارائه شده در [۱۴] دقت پیش‌بینی خطوط مناسب برای کلیدزنی بهبود یافته است.

در [۱۵] برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط به‌عنوان یک اقدام کنترلی پیشگیرانه در مقابل پیشامدهای احتمالی متناظر با خروج تکی ژنراتورها و یا خطوط انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که در برخی موارد، کلیدزنی خطوط نه تنها می‌تواند باعث کاهش هزینه تولید ژنراتورها در حالت عادی سیستم شود، بلکه به دلیل تغییر آرایش شبکه و تأثیر آن بر روی توان خطوط، ممکن است قطع بار اجباری باس‌ها و میزان نیاز به ذخیره چرخان ژنراتورها در پیشامدهای احتمالی را نیز کاهش دهد. در آن مقاله، به دلیل آنکه محاسبه توان خطوط با استفاده از پخش بار DC انجام شده مسئله‌ی برنامه‌ریزی، به‌صورت خطی آمیخته با عدد صحیح بیان شده است. اما در عمل که باید قیود AC و محدودیت‌های توان راکتیو و ولتاژ باس‌ها نیز در نظر گرفته شود، مسئله به شکل MINLP تبدیل شده و روش آن مقاله قابل استفاده نخواهد بود. از این‌رو در مقاله حاضر سعی شده است تا در مسئله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان، قیود AC و توان راکتیو و ولتاژ شین‌ها نیز در نظر گرفته شود که نوآوری اصلی مقاله می‌باشد. برای آنکه در این حالت از تبدیل مسئله بهینه‌سازی به MINLP اجتناب شود، با استفاده از

کاهش هزینه انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط و قیود پخش بار AC

بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۳ تهران، ایران

$$Q_{k,mn,c}: \text{توان راکتیو خط } k \text{ از باس } m \text{ به باس } n \text{ در حالت } c \text{ (مگاوار)}$$

$$P_{d,m}: \text{بار اکتیو باس } m \text{ (مگاوات)}$$

$$Q_{d,m}: \text{بار راکتیو باس } m \text{ (مگاوار)}$$

$$S_{k,max}: \text{توان نامی خط } k \text{ (برحسب ولت‌آمپر)}$$

$$P_{g,max}: \text{حداکثر توان اکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور } g \text{ (مگاوات)}$$

$$P_{g,min}: \text{حداقل توان اکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور } g \text{ (مگاوات)}$$

$$Q_{g,max}: \text{حداکثر توان راکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور } g \text{ (مگاوار)}$$

$$Q_{g,min}: \text{حداقل توان راکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور } g \text{ (مگاوار)}$$

$$RR_g: \text{نرخ تغییر تولید ژنراتور } g \text{ (برحسب مگاوات بر دقیقه)}$$

$$delp_{m,c}: \text{بار اکتیو قطع شده در باس } m \text{ در حالت } c \text{ (برحسب مگاوات)}$$

$$delq_{m,c}: \text{بار راکتیو قطع شده در باس } m \text{ در حالت } c \text{ (برحسب مگاوار)}$$

$$V_{m,c}: \text{اندازه ولتاژ باس } m \text{ در حالت } c$$

$$V_{m,max}: \text{حداکثر اندازه ولتاژ باس } m$$

$$V_{m,min}: \text{حداقل اندازه ولتاژ باس } m$$

$$\delta_{mn,c}: \text{اختلاف زاویه ولتاژ باس‌های } m \text{ و } n \text{ در حالت } c$$

$$\delta_{max}: \text{حداکثر اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها}$$

$$\delta_{min}: \text{حداقل اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها}$$

$$C_g: \text{هزینه خرید انرژی از ژنراتور } g \text{ (برحسب دلار بر مگاوات)}$$

$$C_g^u: \text{هزینه خرید ذخیره چرخان افزایشی از ژنراتور } g \text{ (دلار بر مگاوات)}$$

$$C_g^d: \text{هزینه خرید ذخیره چرخان کاهشی از ژنراتور } g \text{ (دلار بر مگاوات)}$$

$$r_g^u: \text{ذخیره چرخان افزایشی خریداری شده از ژنراتور } g \text{ (مگاوات)}$$

$$r_g^d: \text{ذخیره چرخان کاهشی خریداری شده از ژنراتور } g \text{ (مگاوات)}$$

$$P_{g,0}: \text{توان اکتیو تأمین شده در حالت عادی توسط ژنراتور } g \text{ (مگاوات)}$$

$$P_{g,c}: \text{توان اکتیو ژنراتور } g \text{ در پیشامد احتمالی } c \text{ (مگاوات)}$$

$$Q_{g,c}: \text{توان راکتیو تأمین شده توسط ژنراتور } g \text{ در حالت } c \text{ (مگاوار)}$$

$$VOLL: \text{ارزش بار قطع شده (دلار بر مگاوات)}$$

$$Pr_c: \text{احتمال وقوع پیشامد احتمالی } c$$

$$P_{k,mn,c}: \text{توان اکتیو خط } k \text{ از باس } m \text{ به باس } n \text{ در حالت } c \text{ (مگاوات)}$$

$$\sum_{g \in m} P_{g,c} - \sum_{k \in m} P_{k,mn,c} = P_{d,m} - delp_{m,c}, \forall m, c \quad (2)$$

$$\sum_{g \in m} Q_{g,c} - \sum_{k \in m} Q_{k,mn,c} = Q_{d,m} - delq_{m,c}, \forall m, c \quad (3)$$

$$P_{k,mn,c} = N_{k,c} V_{m,c} V_{n,c} (G_{mn} \cos \delta_{mn,c} + B_{mn} \sin \delta_{mn,c}) - G_{mn} V_{m,c}^2 \quad (4)$$

$$Q_{k,mn,c} = N_{k,c} V_{m,c} V_{n,c} (G_{mn} \sin \delta_{mn,c} - B_{mn} \cos \delta_{mn,c}) + B_{mn} V_{m,c}^2 \quad (5)$$

$$P_{k,mn,c}^2 + Q_{k,mn,c}^2 \leq N_{k,c} S_{k,max}^2, \forall k, c \quad (6)$$

$$N_{g,c} P_{g,min} \leq P_{g,c} \leq N_{g,c} P_{g,max}, \forall g, c \quad (7)$$

$$N_{g,c} Q_{g,min} \leq Q_{g,c} \leq N_{g,c} Q_{g,max}, \forall g, c \quad (8)$$

$$P_{g,0} - r_g^d \leq P_{g,c} \leq P_{g,0} + r_g^u, \forall c \neq 0 \quad (9)$$

$$0 \leq r_g^u \leq P_{g,max} - P_{g,0}, \forall g \quad (10)$$

$$0 \leq r_g^d \leq P_{g,0} - P_{g,min}, \forall g \quad (11)$$

$$r_g^u \leq 10RR_g, \forall g \quad (12)$$

$$r_g^d \leq 10RR_g, \forall g \quad (13)$$

$$0 \leq delp_{m,c} \leq P_{d,m}, \forall m, c \quad (14)$$

$$delq_{m,c} = Q_{d,m} \cdot (delp_{m,c} / P_n^{dem}), \forall m, c \quad (15)$$

$$delp_{m,0} = 0, \forall m \quad (16)$$

$$\delta_{min} \leq \delta_{mn,c} \leq \delta_{max}, \forall m, n, c \quad (17)$$

$$V_{m,min} \leq V_{m,c} \leq V_{m,max}, \forall m, c \quad (18)$$

که در روابط فوق داریم:

جملات اول تا سوم در (۱)، به ترتیب هزینه‌های تأمین انرژی و ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی هستند. جمله چهارم، نشان دهنده هزینه بار قطع شده در پیشامدهای احتمالی با توجه به احتمال وقوع آن‌ها است. روابط بعدی، قیود مسئله هستند که هم در حالت عادی سیستم (بدون خروج تجهیزات شبکه) و هم در پیشامدهای احتمالی برقرار می‌باشند. روابط (۲) و (۳)، به ترتیب بیان کننده قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس هستند. روابط (۴) و (۵)، توان عبوری از خطوط انتقال را محاسبه می‌کنند. روابط (۳) و (۶) و (۸)، تأثیرات توان راکتیو شبکه را بیان می‌کنند که در مدل پخش بار DC در نظر گرفته نمی‌شوند. رابطه (۹) نشان می‌دهد که تغییرات توان ژنراتورها در پیشامدهای احتمالی نمی‌تواند بیشتر از ذخیره‌های چرخان افزایشی و کاهشی آن‌ها باشد. روابط (۱۰) تا (۱۳)، حداکثر مقدار ذخیره‌های چرخان افزایشی و کاهشی قابل تأمین هر ژنراتور را با توجه به توان تولیدی و محدودیت نرخ تغییر تولید آن تعیین می‌کند. بر اساس رابطه (۱۵)، فرض می‌شود که قطع بار راکتیو هر باس متناسب با قطع بار اکتیو آن باس است. رابطه (۱۶)، بیان می‌کند که در حالت عادی سیستم، قطع بار وجود ندارد.

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد اگر کلیدزنی خطوط با متغیرهای باینری در مسئله بهینه‌سازی AC-OTS مدل شود (مقدار  $N_{k,0}$  از حل مسئله بهینه‌سازی به دست آید) در این صورت با یک مسئله MINLP روبرو

$$Q_{k,mm} = V_m V_n (G_{mn} \sin \delta_{mn} - B_{mn} \cos \delta_{mn}) + B_{mn} V_m^2 \quad (23)$$

$$P_{k,nm}^2 + Q_{k,nm}^2 \leq S_{k,max}^2, \forall k \quad (24)$$

$$P_{g,min} \leq P_{g,0} \leq P_{g,max}, \forall g \quad (25)$$

$$Q_{g,min} \leq Q_{g,0} \leq Q_{g,max}, \forall g \quad (26)$$

$$\delta_{min} \leq \delta_{mn} \leq \delta_{max}, \forall m, n, c \quad (27)$$

$$V_{m,min} \leq V_m \leq V_{m,max}, \forall m, c \quad (28)$$

پس از حل مسئله پخش بار بهینه، برای هر خط ضریبی به نام  $\alpha_k^{AC}$  با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_k^{AC} = (\pi_m^P - \pi_n^P) P_{kmm} + (\pi_m^Q - \pi_n^Q) Q_{kmm} \quad (29)$$

که در رابطه فوق،  $P_{kmm}$  و  $Q_{kmm}$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خط  $k$  بوده و  $\pi^P$  و  $\pi^Q$  نیز به ترتیب هزینه حاشیه‌ای یا دوگان قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو مربوط به باس‌های  $m$  و  $n$  در دو سر خط هستند. کلید اصلی ایده ابتکاری جهت تعیین خطوط کاندید، رتبه‌بندی خطوط بر اساس  $\alpha_k^{AC}$  از منفی‌ترین مقدار تا مثبت‌ترین مقدار می‌باشد. یعنی پیش‌بینی می‌شود که احتمالاً با خارج کردن خطوطی که منفی‌ترین مقدار  $\alpha_k^{AC}$  را دارند، بیشترین میزان کاهش در هزینه تولید ایجاد خواهد شد. مزیت این روش آن است که در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری می‌توان بدون استفاده از متغیر باینری، به طور تقریبی بهینه‌ترین خطوط برای خارج کردن از مدار را تعیین کرد. در نتیجه به جای حل مسأله MINLP، کافی است یک مسأله NLP حل شود که حل آن ساده‌تر و مطمئن‌تر است.

نتایج در [۱۴] نشان می‌دهد که رتبه‌بندی خطوط بر اساس  $\alpha_k^{AC}$  در برخی از موارد قادر به پیش‌بینی برخی از خطوط بهینه در هر مرحله نیست. لذا ممکن است مجموعه خطوطی که باز می‌شوند کاهش هزینه چشم‌گیری نداشته باشند. لذا در این مقاله، به دنبال راهکاری هستیم که بقیه خطوط بهینه را تعیین کند. با بررسی‌های انجام شده، مشخص شده است که اکثر خطوطی که  $\alpha_k^{AC}$  های منفی بزرگی دارند در اطراف خطوط پرشده شبکه هستند. ضمن آنکه مقدار  $\alpha_k^{AC}$  محاسبه شده برای خطوط پرشده نیز مثبت است که در برخی موارد مقادیر بزرگی دارند. در چنین مواردی ممکن است باز شدن خود خط پرشده نیز باعث کاهش قابل ملاحظه هزینه تولید ژنراتورها شود. در نتیجه، در روش پیشنهادی در مقاله حاضر، برای خطوط پرشده از قرینه مقدار  $\alpha_k^{AC}$  (یعنی  $-1 \times \alpha_k^{AC}$ ) در رتبه‌بندی خطوط شبکه استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با این کار، روش پیشنهادی در برخی موارد قادر به پیش‌بینی خطوطی است که در روش ارائه

خواهیم بود که حل‌کننده مناسبی که جواب آن حتماً بهینه سراسری باشد، برای حل آن موجود نیست. لذا باید از روش‌های ابتکاری برای پیش‌بینی بهینه‌ترین خطوط استفاده گردد. یعنی مقدار  $N_{k,0}$  از قبل تعیین گردد. در ادامه با بکارگیری روش ارائه شده در [۱۴] که دقت پیش‌بینی آن با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله افزایش یافته است، به حل مسئله مورد نظر پرداخته می‌شود.

### 3. الگوریتم ابتکاری بر مبنای پخش بار بهینه

#### AC

در روش ارائه شده در [۱۴] مناسب‌ترین خطوط برای کلیدزنی که بیشترین کاهش هزینه را به همراه دارند با حل پخش بار بهینه ACOPF تعیین می‌شوند. البته روابط روش فوق فقط با در نظر گرفتن حالت عادی شبکه و بدون لحاظ کردن پیشامدهای احتمالی است. اما در عمل بخش اصلی هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را هزینه انرژی تشکیل می‌دهد و هزینه تأمین ذخیره چرخان و هزینه قطع بار در مقایسه با آن کمتر است. در نتیجه می‌توان فرض نمود که اگر با خارج کردن خطوطی از سیستم بتوان همراه با حفظ قیود امنیت، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه تأمین انرژی ایجاد کرد، هزینه کل سیستم نیز کاهش خواهد یافت.

روش مرجع [۱۴] به صورت یک الگوریتم چند مرحله‌ای است که در هر مرحله یک خط از مدار خارج می‌شود و سپس الگوریتم برای آرایش جدید شبکه تکرار می‌گردد. در هر مرحله، خطوط باقیمانده در سیستم بر اساس ضریبی که برای هر خط محاسبه می‌شود رتبه‌بندی می‌گردند. برای محاسبه ضرایب مورد نظر، ابتدا یک مسئله پخش بار بهینه با قیود AC و در حالت عادی سیستم حل می‌شود که روابط آن به شرح زیر است.

با حذف جملات مربوط به ذخیره چرخان و قطع بار در (۱) و حذف قیود (۹) تا (۱۶) و همچنین قرار دادن  $N_{k,c} = 1$  در روابط فرمول‌بندی ACOPF به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\min \sum_g C_g P_{g,0} \quad (19)$$

نسبت به قیود زیر:

$$\sum_{g \in m} P_{g,0} - \sum_{k \in m} P_{k,mm} = P_{d,m}, \forall m \quad (20)$$

$$\sum_{g \in m} Q_{g,0} - \sum_{k \in m} Q_{k,mm} = Q_{d,m}, \forall m \quad (21)$$

$$P_{k,mm} = V_m V_n (G_{mn} \cos \delta_{mn} + B_{mn} \sin \delta_{mn}) - G_{mn} V_m^2 \quad (22)$$

جدول ۱: اطلاعات واحدهای تولیدی سیستم استاندارد ۵۷ باسه IEEE

واحد	باس	$C_g$ (\$/MWh)	$P_{i,min}$ (MW)	$P_{i,max}$ (MW)
{۳و۱}	۱	۱۰	۲۰	۵۷۵/۵
۵	۲	۱۷/۵	۲۰	۱۰۰
{۶و۷}	۳	۱۸/۵	۲۰	۱۴۰
{۸و۹}	۶	۱۷	۲۰	۲۰۰
{۱۰و۱۱و۱۲}	۸	۱۱	۲۰	۳۵۰
۱۳	۹	۱۸/۵	۲۰	۱۰۰
{۱۴و۱۵و۱۶و۱۷}	۱۲	۱۵/۵	۲۰	۴۱۰

تولیدی کوچک‌تر و یکسان تقسیم شده است. محدوده اندازه ولتاژ

باس‌ها بین ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت و حداکثر اختلاف زاویه ولتاژهای بین

باس‌های دو سر هریک از خطوط ۰/۶ رادیان در نظر گرفته شده است.

#### 4.1. مقایسه روش پیشنهادی با روش مرجع [۱۴]

##### از نظر دقت تعیین بهترین خطوط برای کلیدزنی

در این قسمت ابتدا مسئله ACOPF (روابط ۱۹ تا ۲۸) با حضور همه خطوط سیستم حل شده و در این حالت، هزینه سیستم ۱۹۰۲۸ دلار به دست آمده است و خطوط ۱-۱۵ و ۸-۹ و ۷-۲۹ پر شده هستند.

در ابتدا برای تعیین بهترین ترکیب ممکن از کلیدزنی خطوط به صورت ترتیبی همه خطوط انتقال برای کلیدزنی کاندیدا قرار داده شده‌اند، در واقع پارامتر کنترلی I یعنی تعداد خطوط کاندیدا در هر مرحله از روش ابتکاری، برابر با ۸۰ (تعداد خطوط سیستم) قرار داده شده است. جدول ۲ نتایج هر مرحله را نشان می‌دهد که شامل بهترین خط خارج شده و درصد کاهش هزینه ناشی از خروج آن نسبت به هزینه اولیه سیستم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این سیستم با باز کردن ۵ خط، ۱۳/۵۵٪ کاهش هزینه بدست آمده است که صرفه‌جویی قابل توجهی می‌باشد. البته باید در نظر داشت که اگرچه این روش بهینه‌ترین خطوط را تعیین می‌کند اما با توجه به زمان حل بسیار زیاد آن (به علت بررسی کلیدزنی همه خطوط) در عمل قابل اجرا نیست.

در ادامه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۴] به ازای  $I=5$  مقایسه شده‌اند. یعنی در هر مرحله، محاسبات ACOPF و تعیین هزینه فقط به ازای خارج کردن ۵ خط اول در رتبه‌بندی خطوط انجام شده است. در روش پیشنهادی، برای رتبه‌بندی خطوط در هر مرحله، از مقدار  $\alpha_k^{AC}$  برای خطوط پر نشده و  $-\alpha_k^{AC}$  برای خطوط پر شده استفاده شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با باز کردن فقط سه

شده در [۱۴] قابل پیش‌بینی نبوده‌اند و لذا ممکن است بتوان صرفه‌جویی بیشتری در هزینه‌های سیستم ایجاد کرد.

به این ترتیب، الگوریتم تعیین مناسب‌ترین خطوط جهت کلیدزنی به صورت زیر است. در این روش در هر مرحله یک خط خارج می‌شود. انتخاب خط مورد نظر در هر مرحله در گام‌های زیر انجام می‌شود:

گام ۱: حل مسئله ACOPF (روابط ۱ تا ۱۸ و یا ۱۹ تا ۲۸) با خطوط باقیمانده در شبکه

گام ۲: محاسبه  $\alpha_k^{AC}$  برای خطوط با استفاده از رابطه (۲۹) و محاسبه  $-\alpha_k^{AC}$  برای خطوط پر شده و رتبه‌بندی خطوط بر اساس آن‌ها

گام ۳: انتخاب I خط اول از رتبه‌بندی و خارج کردن تک‌تک آن‌ها و حل مجدد مسئله ACOPF و تعیین هزینه سیستم به ازای خروج هر خط

گام ۴: خارج کردن خطی که باعث بیشترین کاهش هزینه می‌شود.

گام ۵: در صورت نیاز به کلیدزنی خط بعدی، گام‌های اول تا چهارم با آرایش جدید شبکه تکرار می‌شوند.

در هر مرحله از الگوریتم، مقدار  $Nk,0$  برای خطوط خارج شده، صفر در نظر گرفته می‌شود. از حل مسئله، مقدار بهینه‌ی توان و ذخیره‌های چرخان تخصیص یافته به ژنراتورها و قطع بار باس‌ها در پیشامدهای احتمالی تعیین می‌گردد.

## 4. مطالعات عددی

روش پیشنهادی برای تخصیص انرژی و ذخیره چرخان، در سیستم استاندارد ۵۷ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. در ابتدا روش پیشنهادی در این مقاله با روش ارائه شده در [۱۴] از نظر دقت پیش‌بینی خطوط مناسب برای کلیدزنی مقایسه شده است. پس از آن، تأثیر کلیدزنی خطوط بر هزینه تخصیص انرژی و ذخیره چرخان بررسی شده است. برای بهینه‌سازی توابع هدف، از نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CONOPT استفاده شده است.

اطلاعات سیستم ۵۷ باسه در [۱۶] آورده شده است. در این سیستم ۷ ژنراتور، از طریق ۸۰ خط انتقال توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارها که به ترتیب  $1250/8$  MW و  $336/4$  MW است را تأمین می‌کنند. اطلاعات مربوط به ژنراتورها و هزینه پیشنهادی آن‌ها از [۱۱] اقتباس شده و در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به بزرگ بودن ظرفیت تولید برخی از ژنراتورها، مسئله پخش بار بهینه در صورت خروج آن‌ها قادر به همگرایی نیست. از این رو، ظرفیت تولید ژنراتورهای بزرگ سیستم به چند واحد

ارزش بار ازدست‌رفته (VOLL) ۱۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات و احتمال وقوع خروج مرتبه اول تجهیزات ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که هزینه پیشنهادی ژنراتورها برای ذخیره چرخان افزایشی و کاهش، ۱۰٪ هزینه پیشنهادی آن‌ها برای تولید انرژی باشد. نرخ تغییر تولید ژنراتورها نیز ۳ مگاوات بر دقیقه فرض شده است.

با حل مسئله تخصیص انرژی و ذخیره چرخان (توصیف‌شده با روابط ۱ تا ۱۸) و به ازای خارج نشدن هیچ خطی از شبکه، کل هزینه ۱۹۸۴۰ دلار به دست آمده است. در ادامه، با محاسبه ضرایب  $\alpha_k^{AC}$  و رتبه‌بندی خطوط بر اساس روش پیشنهادی، خطوطی که خروج ترتیبی آن‌ها موجب بیشترین کاهش هزینه در هر مرحله می‌شود تعیین شده است و کل هزینه سیستم پس از خروج آن‌ها محاسبه شده است. جدول ۵، هزینه‌های سیستم را به ازای کلیدزنی خطوط پیشنهاد شده با روش پیشنهادی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با باز کردن تنها ۳ خط هزینه انرژی ۱/۱۳٪ و قطع بار شبکه ۲/۶۸٪ کاهش یافته است، اما هزینه ذخیره‌های چرخان ۳۱/۷٪ افزایش داشته است و در مجموع کلیدزنی خطوط با روش پیشنهادی، ۱۴/۴۷٪ کاهش هزینه برای سیستم ۵۷ باسه به همراه داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که باز کردن خطوط بهینه علاوه بر کاهش هزینه حتی ممکن است قطع بار سیستم را کاهش و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد.

قابل ذکر است که اگر رتبه‌بندی خطوط بر اساس روش ارائه شده در [۱۴] انجام شود نتیجه آن، باز کردن دو خط و تنها ۲/۵٪ کاهش هزینه برای سیستم خواهد بود. نتیجه دیگر در شبیه‌سازی‌ها آن است که بخش اعظم کاهش هزینه معمولاً ناشی از کلیدزنی تعداد محدودی از خطوط است. به عنوان مثال بر اساس جدول ۵، خارج کردن خط سوم تأثیر قابل توجهی بر روند کاهش هزینه ندارد. این نتیجه نشان می‌دهد که کلیدزنی بهینه خطوط در عمل نیز امکان‌پذیر بوده و نیاز به اجرای مانورهای متعدد در شبکه ندارد.

جدول ۵: هزینه انرژی و ذخیره چرخان و بار قطع شده سیستم (برحسب دلار)

با توجه به کلیدزنی خطوط تعیین شده با روش پیشنهادی

تعداد خطوط خارج شده			
۳	۲	۱	۰
۱۵-۱۳	۴-۳	۱۵-۱	-
۱۶۵۳۱/۵	۱۶۵۸۰/۱	۱۷۰۵۹/۶	۱۹۰۲۸/۵
۲۰۵/۲	۲۱۳/۰	۱۹۱/۲	۱۵۶/۵
۲۹/۷	۲۹/۳	۳۱/۷	۲۱/۹
۲۰/۱/۴	۲۳۳	۱۹۹/۱	۶۳۳/۱
۱۶۹۶۸/۸	۱۷۰۵۵/۴	۱۷۴۸۱/۶	۱۹۸۴۰
۱۴/۴۷	۱۴/۰۴	۱۱/۸۹	-
			(٪)

جدول ۲: نتایج حاصل از کلیدزنی بهترین خطوط برای کاهش هزینه

مرحله	خط باز شده	هزینه (دلار)	کاهش هزینه (٪)
۱	۱۵-۱	۱۷۰۵۶	۱۰/۳۷
۲	۴-۳	۱۶۵۵۵	۱۳
۳	۱۵-۱۴	۱۶۵۲۱	۱۳/۱۸
۴	۲۱-۲۰	۱۶۴۷۷	۱۳/۴
۵	۵۰-۴۹	۱۶۴۴۹	۱۳/۵۵

جدول ۳: نتایج حاصل از کلیدزنی خطوط تعیین شده توسط روش پیشنهادی

مرحله	خط باز شده	هزینه (دلار)	کاهش هزینه (٪)
۱	۱۵-۱	۱۷۰۵۶	۱۰/۳۶
۲	۴-۳	۱۶۵۵۵	۱۳
۳	۱۵-۱۳	۱۶۵۲۹	۱۳/۱۴

جدول ۴: نتایج حاصل از خروج خطوط تعیین شده توسط مرجع [۱۴]

مرحله	خط باز شده	هزینه (دلار)	کاهش هزینه (٪)
۱	۲-۱	۱۸۱۶۵	۴/۵۴
۲	۴-۳	۱۷۶۲۰	۷/۴
۳	۱۵-۱۴	۱۷۴۵۰	۸/۳
۴	۱۵-۱۳	۱۶۹۱۲	۱۱/۱۲

خط که با روش پیشنهادی مشخص شده‌اند میزان صرفه‌جویی ۱۳/۱۴٪ است که تقریباً با مقدار بهینه‌ی جدول ۲، برابر شده است و پس از آن دیگر کاهش هزینه‌ای وجود ندارد.

از طرف دیگر نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که با روش [۱۴] که رتبه‌بندی خطوط را بر اساس  $\alpha_k^{AC}$  برای همه خطوط انجام می‌دهد، حداکثر کاهش هزینه در صورت خروج ۴ خط ایجاد می‌شود و مقدار آن نیز ۲٪ کمتر از روش پیشنهادی است. علت آن است که خط ۱-۱۵ که یکی از خطوط پرشده است  $\alpha_k^{AC}$  مثبت بزرگی دارد که با روش [۱۴] خروج آن بررسی نمی‌گردد. این نتایج و سایر مطالعات انجام شده روی این سیستم و سایر سیستم‌های تست - که از ارائه آن‌ها در اینجا صرف‌نظر شده است - نشان می‌دهند که روش پیشنهادی تعداد محاسبات مورد نیاز را بسیار کاهش داده است و همچنین نسبت به روش [۱۴] در پیش‌بینی خطوط مناسب برای کلیدزنی موفق‌تر عمل کرده است.

## 2.4. بررسی تاثیر کلیدزنی خطوط انتقال بر هزینه

### انرژی و ذخیره چرخان و قطع بار سیستم

در این بخش، تأثیر کلیدزنی خطوط بر کل هزینه انرژی و ذخیره چرخان و میزان قطع بار شبکه در پیشامدهای احتمالی بررسی می‌شود.

- [12] J. D. Fuller, R. Ramasra, and A. Cha, "Fast Heuristics for Transmission-Line Switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1377-1386, Aug. 2012.
- [13] P. A. Ruiz, J. M. Foster, A. Rudkevich, and M. C. Caramanis, "Tractable transmission topology control using sensitivity analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1550-1559, 2012.
- [14] M. Soroush, J.D. Fuller, "Accuracies of Optimal Transmission Switching Heuristics Based on DCOPF and ACOPF" *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 924 - 932, 24 Oct. 2013.
- [15] G. Ayala, A. Street, "Energy and reserve scheduling with post-contingency transmission switching" *Elec. Power Ener. Syst.*, vol. 111, pp. 133-140, June 2014.
- [16] Power Systems Test Case Archive, Dept. Elect. Eng., Dept. Elect. Eng., Univ. Washington, [Online]. Available: [https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg\\_tca57bus.htm](https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm).

## 5. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا روشی برای پیش‌بینی دقیق‌تر خطوط بهینه برای کلیدزنی در جهت کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم قدرت پیشنهاد شده است و سپس تأثیر کلیدزنی خطوط انتقال بر هزینه انرژی و ذخیره چرخان و قطع بار سیستم با در نظر گرفتن پیشامدهای احتمالی، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی ضمن حفظ امنیت شبکه، قادر به صرفه‌جویی در هزینه بهره‌برداری سیستم نیز هست. مزایای روش پیشنهادی آن است که هم قیود غیرخطی مربوط به معادلات پخش بار AC و محدودیت ولتاژ باس‌ها را در نظر می‌گیرد و هم خطوط مناسب برای کلیدزنی را با دقت خوب و محاسبات نه‌چندان زیاد تعیین می‌کند. همچنین پخش اعظم کاهش هزینه معمولاً ناشی از کلیدزنی تعداد محدودی از خطوط است و لذا پیاده‌سازی کلیدزنی بهینه خطوط در عمل امکان‌پذیر بوده و نیاز به اجرای مانورهای متعدد در شبکه ندارد.

## منابع

- [1] A. Mazi, B. Wollenberg, and M. Hesse, "Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 3, pp. 258-265, Aug. 1986.
- [2] E. Makram, K. Thornton, and H. Brown, "Selection of lines to be switched to eliminate overload lines using a z-matrix method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 653-661, May 1989.
- [3] R. Bacher and H. Glavitsch, "Loss reduction by network switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 447-454, May 1988.
- [4] J. Rolim and L. Machado, "A study of the corrective switching in transmission switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 336-341, Feb. 1999.
- [5] W. Shao and V. Vittal, "Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1877-1885, Nov 2005.
- [6] E. B. Fisher, R. P. O'Neill, and M. C. Ferris, "Optimal transmission switching," *IEEE Trans Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1346-1355, Aug. 2008.
- [7] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Optimal transmission switching—Sensitivity analysis and extensions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1469-1479, Aug. 2008.
- [8] K.W. Hedman, R.P. O'Neill, E.B. Fisher, and S.S. Oren, "Optimal transmission switching with contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1577-1586, Aug. 2009.
- [9] K.W. Hedman, M.C. Ferris, R.P. O'Neill, E.B. Fisher, S.S. Oren, "Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with n-1 reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1052-1063, May. 2010.
- [10] T. Potluri and K. W. Hedman, "Impacts of topology control on the ACOPF" presented at Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2012, pp. 1-7.
- [11] M. Khanabadi, H. Ghasemi, and M. Doostizadeh, "Optimal Transmission Switching Considering Voltage Security and N-1 Contingency Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 542-550, Feb. 2013.



# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله