

کلیدزنی بهینه خطوط انتقال مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا

فرزانه پوراحمدی^۱، محمد جوشکی^۲ و سید حمید حسینی^۳

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف، pourahmadi_f@ee.sharif.edu

^۲ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف، jooshaki_Mohammad@ee.sharif.edu

^۳ هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف، hosseini@sharif.edu

چکیده - یکی از اهداف اصلی بهره‌برداران سیستم‌های قدرت کاهش هزینه‌های تامین بار است. در راستای این هدف، حل مسائل بهینه‌سازی مختلفی از جمله توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه‌ها و برنامه در مدار قرار گرفتن واحدها متداول می‌باشد. به‌طور سنتی، در حل این مسائل، شبکه انتقال به عنوان یک سیستم ثابت در نظر گرفته شده و قابلیت کلیدزنی خطوط انتقال، در توابع هزینه مدل نمی‌گردد. با در نظر گرفتن این قابلیت تعداد بسیار زیادی متغیر باینری به تابع هدف افزوده می‌شود که منجر به افزایش شدید زمان حل دقیق مسئله می‌گردد. بر این اساس، در این مقاله روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله کلیدزنی بهینه خطوط انتقال ارائه می‌شود. در این روش در ابتدا مسئله کلیدزنی بهینه به صورت مرحله به مرحله مدل می‌شود. سپس جهت کاهش فضای جستجو، در هر مرحله، خطوط کاندیدا بر اساس معیارهای مناسبی گزینش می‌شوند. این روش نه تنها به حل سریعتر مسئله منجر می‌شود، بلکه در صورت استفاده از پخش بار بهینه AC امکان تاثیر سایر قیود بهره‌برداری که در مدل‌های DC ارائه شده، از آنها صرف نظر می‌شود نیز فراهم می‌گردد. در نهایت به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی جهت دستیابی به پاسخ بهینه و کاهش زمان محاسبات، نتایج مطالعه عددی بر روی شبکه *IEEE 118-bus* ارائه می‌شود.

کلید واژه - کلیدزنی بهینه، برنامه‌ریزی پویا، خطوط انتقال برق، سیستم‌های قدرت.

در گذشته کلیدزنی خطوط انتقال تنها در شرایط اضطراری به عنوان یک روش کنترلی بکار می‌رفت. تحت این شرایط، کلیدزنی خطوط انتقال جهت حل مشکلات اضافه ولتاژ یا افت ولتاژ، اضافه بار خطوط [۱]-[۲]، کاهش هزینه تلفات [۳]-[۴]، افزایش امنیت سیستم [۵] و یا ترکیبی از این‌ها [۶] مورد بررسی قرار می‌گرفت. در این گونه موارد تصمیم‌گیری توسط اپراتور سیستم انجام شده و معمولاً به جای اجرای یک مسئله بهینه‌سازی، کلیدزنی خطوط بر مبنای مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های از پیش تعیین شده صورت می‌پذیرد. همچنین لازم به ذکر است که در شرایط اضطراری، سیستم‌های حفاظت ویژه متعددی (SPS) نیز وجود دارند که عملیات کلیدزنی را انجام داده و خطوط انتقال را از مدار خارج می‌کنند.

با این حال، کلیدزنی خطوط انتقال علاوه بر شرایط اضطراری می‌تواند در شرایط عادی شبکه نیز مفید واقع شود. در واقع، همگام با تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، کلیدزنی بهینه خطوط انتقال به عنوان چالشی مهم برای بهره‌برداری مطمئن، ایمن و اقتصادی از شبکه قدرت مطرح شده است.

مفهوم کلیدزنی بهینه خطوط انتقال اولین بار در [۷] برای سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده (شرایط بازار) معرفی شد. در این مرجع نحوه بهره‌برداری و جبران سازی دینامیکی توسط المانهای خطوط انتقال مورد بررسی قرار گرفت. مرجع [۸]،

۱- مقدمه

در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، کلیدزنی خطوط انتقال به عنوان روش مفیدی برای بهبود توپولوژی شبکه و کاهش هزینه‌های دیسپاچینگ معرفی می‌شود. در سیستم‌های سنتی، مرکز دیسپاچینگ پخش بار اقتصادی را با فرض ثابت بودن توپولوژی شبکه انتقال انجام داده و میزان تولید بهینه واحدهای نیروگاهی را تعیین می‌کند. در سیستم‌های تجدید ساختار شده نیز این شبکه ثابت، بستری برای رقابت واحدهای تولید فراهم می‌نماید. در صورتی که، با در نظر گرفتن امکان اصلاح توپولوژی شبکه متغیرهای کنترلی بیشتری در اختیار بهره‌بردار شبکه قرار می‌گیرد. در واقع، بهینه‌سازی همزمان تولید و توپولوژی شبکه انتقال می‌تواند راهکار مناسبی برای بهبود بازدهی اقتصادی و عملکرد سیستم قدرت و بازار باشد. پس در این روش، علاوه بر توان خروجی واحدهای تولیدی، می‌توان به کمک قطع یا وصل خطوط انتقال، توپولوژی شبکه را نیز بهینه کرد.

در واقع، کلیدزنی بهینه خطوط انتقال با بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش گرفتگی خطوط، در نهایت باعث دستیابی به هزینه‌های به مراتب پایین‌تری جهت پخش بهینه بار بین واحدهای تولیدی می‌شود.

خطوط تعیین می‌شود و سپس تعدادی از آنها گزینش شده و مورد بررسی قرار داده می‌شوند.

در ادامه مقاله در بخش دوم، مسئله و فرمولاسیون کلیدزنی خطوط انتقال تشریح شده است. بخش سوم به ارائه روش پیشنهادی می‌پردازد. در نهایت، کارایی روش پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی بر روی شبکه IEEE 118-bus در بخش چهارم نشان داده شده و نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- مسأله کلید زنی بهینه خطوط انتقال

هدف از مسئله بهینه‌سازی کلیدزنی خطوط انتقال، کمینه کردن هزینه کل سیستم، شامل هزینه تولید انرژی است که برای سیستم‌هایی که پخش بار به صورت متمرکز انجام می‌شود، معتبر است. در سیستم‌های تجدید ساختار شده نیز ISO با در نظر گرفتن قیمت پیشنهادی واحدها، هزینه کل سیستم را کمینه می‌کند. در این فرمولاسیون به هر خط یک متغیر باینری z_k تخصیص داده می‌شود که نشان دهنده بودن یا نبودن خط k در شبکه است. بنابراین فرمولاسیون مسئله در سیستم‌های سنتی و تجدید ساختار شده بر مبنای پخش بار DC به صورت زیر خواهد بود:

$$TC = \min \sum_g c_{ng} P_{ng} \quad (1)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_{ns} \leq \theta_n^{\max}, \quad \forall s, n \quad (2)$$

$$P_{ng}^{\min} \leq P_{ngs} \leq P_{ng}^{\max}, \quad \forall g, s, n \quad (3)$$

$$\sum_{\forall k | i=n} P_{ijks} - \sum_{\forall k | j=n} P_{ijks} + \sum_g P_{ngs} - \sum_d P_{nd} = 0 \quad (4)$$

$$P_{nmk}^{\min} z_k \leq P_{nmks} \leq P_{nmk}^{\max} z_k, \quad \forall k, s \quad (5)$$

$$B_k (\theta_{ns} - \theta_{ms}) - P_{nmks} + (2 - z_k) M_k \geq 0, \quad \forall k, s \quad (6)$$

$$B_k (\theta_{ns} - \theta_{ms}) - P_{nmks} - (2 - z_k) M_k \leq 0, \quad \forall k, s \quad (7)$$

$$z_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

در روابط بالا، M_k یک عدد بزرگ، θ_{ns} زاویه ولتاژ باس n و θ_n^{\min} و θ_n^{\max} به ترتیب بیشینه و کمینه زاویه ولتاژ در باس n توان حقیقی عبوری از باس m به باس n برای خط k P_{nmks} توان حقیقی تولیدی ژنراتور g متصل به باس n P_{ngs} توان حقیقی بار d قرار گرفته در باس n c_{ng} هزینه تولید انرژی ژنراتور g و B_k سوسپتانس خط k است. اندیس s بیان کننده حالت کلیدزنی می‌باشد.

محدودیت‌های بهره‌برداری شامل محدودیت زاویه ولتاژ، محدودیت توان خروجی واحدها و محدودیت توان عبوری از

مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) مبتنی بر پخش بار DC را برای حل کلیدزنی انتقال ارائه کرده و اثر آن را بر روی پروفیل متغیر بار و پیامدهای عملی کلیدزنی مورد بررسی قرار داده است. در [۹]، قیود $N-1$ نیز به مسأله MIP ارائه شده در [۸] افزوده شده است. با این حال، در این مراجع به علت تمرکز بر بکارگیری پخش بار DC، اثر کلیدزنی خطوط بر روی ولتاژ باس‌ها و همچنین میزان دقیق تلفات دیده نشده است. بنابراین پاسخ بهینه بدست آمده بر اساس این مدل‌ها ممکن است که در مدل AC شبکه قابل اعمال (Feasible) نباشد. بنابراین در [۱۰]، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) مبتنی بر پخش بار AC به منظور ابزاری برای مدیریت پرشدگی خطوط، بدون نقض امنیت ولتاژ ارائه شده است.

با این حال، یکی از مشکلات مدل‌های ارائه شده برای حل مسأله کلیدزنی بهینه خطوط انتقال، زمان بسیار طولانی انجام محاسبات است. در واقع، در شبکه‌های بزرگ به دلیل افزایش تعداد متغیرهای باینری مربوط به خطوط انتقال، زمان محاسبات زیادی برای حل مسئله کلیدزنی مورد نیاز است. بدین منظور چندین روش ابتکاری برای حل این مسأله ارائه شده است [۱۱] - [۱۳]. روش ابتکاری مراجع [۱۲] - [۱۳] مبتنی بر رتبه‌بندی خطوط جهت کلیدزنی بر اساس متغیرهای اولیه و دوگان مدل پخش بار DC و AC است، بدین صورت که در هر تکرار بعد از یافتن خطوط کاندیدا، تنها یک خط که بیشترین کاهش هزینه را داشته انتخاب شده و به مرحله بعد می‌رود. در [۱۴] نیز روش‌هایی برای انتخاب خطوط کاندیدا جهت کاهش تعداد متغیرهای باینری معرفی شده است. با این حال این روش‌ها نیز به علت کاهش بیش از حد فضای جستجو، احتمال قرار گرفتن در نقاط کمینه محلی را افزایش می‌دهند.

در این راستا، در این مقاله روشی ابتکاری بر مبنای برنامه‌ریزی پویا جهت حل مسأله کلیدزنی بهینه خطوط انتقال ارائه گردیده است که استفاده از این روش نه تنها به حل سریعتر مسأله منجر می‌شود، بلکه در صورت استفاده از پخش بار بهینه AC امکان تاثیر سایر قیود بهره‌برداری که در مدل‌های DC، از آنها صرف نظر می‌شود نیز فراهم می‌گردد. همچنین در این روش سعی بر این است که فضای جستجو به صورت غیرمتعارف محدود نشود. با این حال با توجه به اینکه حل کامل مسأله کلیدزنی بهینه خطوط انتقال با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا مستلزم بررسی تعداد بسیار زیادی حالت کلیدزنی مختلف است، لذا برای دستیابی به زمان اجرای قابل قبول، در هر مرحله از اجرای الگوریتم پویا، با استفاده از معیارهایی، اولویت خروج

بیشینه و کمینه توان ظاهری خط $k \in \mathcal{R}^{n \times n}$ ماتریس Y ادمیتانس و $\theta \in \mathcal{R}^{n \times n}$ ماتریس زاویه ادمیتانس است.

۳- مدل پیشنهادی حل مسأله کلید زنی بهینه خطوط انتقال

به صورت کلی مسأله کلیدزنی بهینه، یک مسأله ایستا است. به عبارتی هدف از این مسأله یافتن آرایش بهینه شبکه انتقال برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری تحت شرایط بار مشخص، می‌باشد و لذا هیچگونه توالی زمانی مشخصی مد نظر نیست. با این حال، یکی از روش‌هایی که برای حل مسائل استاتیک که دارای متغیرهای از نوع اعداد صحیح یا باینری می‌باشند، برنامه‌ریزی پویا است.

الگوریتم پیشنهادی برای حل مسأله کلیدزنی بهینه در ابتدا با بررسی N حالت ممکن شروع می‌شود. هر یک از این حالات نشان دهنده یک خط کاندیدای خروج می‌باشد. لازم به ذکر است که مطابق آنچه در بخش قبل بیان شد، بررسی تمامی حالات ممکن، به علت تعداد بسیار بالای آنها ممکن نیست و لذا در هر مرحله تعداد محدودی از حالات گزینش می‌شوند. گزینش این حالات بر اساس شاخص‌هایی که در بخش بعد معرفی می‌شوند صورت می‌پذیرد. در گام بعد به ازای هر یک از این حالات یک لیست اولویت جدید تشکیل داده می‌شود و میزان هزینه کل مسیر جدید محاسبه می‌گردد. علت اصلی این امر که حالات ممکن مرحله بعد، برای هر یک از حالت‌های مرحله فعلی متفاوت انتخاب می‌شود این است که لیست اولویت مرحله بعد تا حد زیادی به وضعیت حالت فعلی بستگی دارد. لذا دو انتخاب ممکن را می‌توان مطرح کرد:

۱. لیست اولویت مرحله بعد را برای کل مسیرهای ممکن

یکسان در نظر گرفته شود.

۲. لیست اولویت مرحله بعد برای هر یک از حالت‌های

مرحله قبل به صورت مجزا در نظر گرفته شود.

با توجه به اینکه در هر مرحله، X (در مرحله اول N) توپولوژی مختلف شبکه مطرح می‌باشد و هر یک از این توپولوژی‌ها محدودیت‌ها و شرایط کاملاً متفاوتی را دارند، لذا انتخاب حالت‌ها و لیست اولویت یکسان برای تمام آنها محدودیت‌هایی را به وجود می‌آورد که ممکن است دستیابی به نقطه بهینه را دچار مشکل کند. لذا در روش پیشنهادی در هر مرحله به ازای هر حالت، لیست اولویت متفاوتی مرتبط با آن حالت تشکیل می‌شود.

خطوط است. تعادل توان در هر باس n طبق رابطه (۴) خواهد بود. در این فرمول‌بندی توان عبوری از خط باز شده باید صفر باشد. با این حال، این مسئله را نمی‌توان تنها با ضرب متغیر باینری در بیشینه و کمینه توان عبوری از خط k مدل کرد؛ چرا که چنین فرمول‌بندی باعث می‌شود که اختلاف زاویه بین دو باس متصل به خط، صفر شود. بنابراین به منظور جلوگیری از چنین حالتی، محدودیت ناشی از وابستگی فلوی عبوری از خط به اختلاف زاویه دو سر آن به صورت دو محدودیت (۶) و (۷) نشان داده می‌شود.

بدیهی است که مدل کلیدزنی انتقال با استفاده از پخش بار DC، یک مدل بدون تلفات است. با این حال کلیدزنی انتقال ممکن است باعث افزایش یا کاهش تلفات شود و در صورت افزایش تلفات، تولید نیز افزایش می‌یابد. اگر چه ممکن است حالتی نیز پیش بیاید که کاهش هزینه‌ها با استفاده از کلیدزنی انتقال باعث افزایش تلفات نیز شود. بنابراین در نظر گرفتن تلفات نیز اهمیت خواهد داشت. همچنین در مسأله مبتنی بر پخش بار AC به دلیل این که محدودیت‌های ولتاژ و توان راکتیو واحدها در نظر گرفته می‌شود، ممکن است به دلیل ناپایداری ولتاژ و یا سایر قیودی که در پخش بار DC مدل نمی‌شوند، جواب بهینه‌ای برای مسأله کلیدزنی بهینه وجود نداشته باشد. بدیهی است که این موارد در فرمولاسیون مبتنی بر پخش بار DC در نظر گرفته نمی‌شود. فرمولاسیون کلیدزنی انتقال مبتنی بر پخش بار AC به صورت زیر خواهد بود:

$$TC = \min \sum_g c_{ng} P_{ngs} \quad (9)$$

$$\sum_g P_{ngs} - \sum_d P_{nd} = \quad (10)$$

$$\sum_j V_{ns} |V_{js}| |V_{ijs}| \cos(\delta_{js} - \delta_{is} + \gamma_{ijs}) - \sum_d Q_{ngs} - \sum_d Q_{nd} = \quad (11)$$

$$- \sum_j V_{ns} |V_{js}| |V_{ijs}| \sin(\delta_{js} - \delta_{is} + \gamma_{ijs})$$

$$P_{ng}^{\min} \leq P_{ngs} \leq P_{ng}^{\max}, \quad \forall g, n, s \quad (12)$$

$$Q_{ng}^{\min} \leq Q_{ngs} \leq Q_{ng}^{\max}, \quad \forall g, n, s \quad (13)$$

$$\delta_n^{\min} \leq \delta_{ns} \leq \delta_n^{\max}, \quad \forall n, s \quad (14)$$

$$|V|_n^{\min} \leq |V|_{ns} \leq |V|_n^{\max}, \quad \forall n, s \quad (15)$$

$$S_{nmk}^{\min} \leq S_{nmks} \leq S_{nmk}^{\max}, \quad \forall k, s \quad (16)$$

$|V|_n^{\max}$ ، $|V|_n^{\min}$ بیشینه و کمینه زاویه ولتاژ باس n ، Q_{ng}^{\max} ، Q_{ng}^{\min} بیشینه و کمینه توان راکتیو ژنراتور g ، S_{nmk}^{\max} ، S_{nmk}^{\min}

در گام بعد، مقدار هزینه تمام مسیرهای ممکن به مرحله بعدی محاسبه می‌شود. تعداد این مسیرها مطابق شکل ۱ برابر $X \times N$ حالت است. سپس میزان هزینه مرتبط با هر یک از این حالت‌ها با یکدیگر مقایسه شده و X حالت از بین آنها گزینش می‌شوند. در روش پیشنهادی برای گزینش این X حالت از مقدار هزینه کل پخش بار بهینه استفاده شده است. به عبارتی از بین $X \times N$ حالت ممکن، X عدد از آنها که کمترین هزینه دیسپاچینگ را دارند، انتخاب می‌شوند. نکته دیگری که در گزینش حالت‌ها باید مدنظر قرار داده شود، حذف حالت‌های مشابهی است که با ترتیب‌های مختلفی در لیست حالت‌های موجود ظاهر شده‌اند.

سپس همین روند تا جایی که الگوریتم به معیار توقف برسد، ادامه پیدا می‌کند. در این مقاله، معیار توقف کمتر بودن مینیمم هزینه مرحله بعد نسبت به مینیمم هزینه مرحله فعلی در نظر گرفته شده است. در بخش بعد جزئیات مربوط به شاخص‌های مورد استفاده جهت تشکیل لیست اولویت بیان خواهد شد.

۳-۱- معیارهایی جهت تشکیل لیست اولویت

در مقالات مختلف روش‌های گوناگونی برای اولویت‌دهی به خطوط جهت کلیدزنی ارائه گردیده است. با این حال به لحاظ مفهومی اکثر آنها تا حدود زیادی مشابه یکدیگر هستند. در این مقاله جهت تشکیل لیست اولویت از معیارهایی که در ادامه به آن می‌پردازیم، استفاده شده است.

۳-۱-۱- نقض محدودیت خطوط انتقال

در ابتدا یک پخش بار بهینه بر روی شبکه پایه انجام می‌شود. در صورتی که هیچ کدام از خطوط به محدودیت خود نرسیده باشند، کلیدزنی مورد نیاز نخواهد بود. زمانی که فلو عبوری از خط به محدودیت خود برسد، می‌تواند به صورت هزینه در تابع هدف ظاهر شود. اگر کلیدزنی باعث شود که نقض محدودیت خطوط انتقال نداشته باشیم، منجر به کاهش هزینه‌های جریمه و در کل کاهش هزینه سیستم می‌شود. بنابراین در درجه اول می‌توان گفت که خطوطی که به محدودیت توان عبوری خود رسیده‌اند، می‌توانند به عنوان کاندیدای خروج انتخاب شوند.

۳-۱-۲- هزینه پرشدگی خطوط انتقال در مدل DC

هزینه پرشدگی به صورت حاصل ضرب اختلاف قیمت بین دو باس n و m که خط k آن‌ها را به هم وصل می‌کند، در فلو

عبوری از خط k تعریف می‌شود. از این شاخص می‌توان برای رتبه‌بندی خطوط پُر شده‌ی سیستم استفاده کرد. باز کردن خطوطی که هزینه پرشدگی بالایی دارند، به احتمال زیاد باعث کاهش هزینه‌های گرفتگی خواهد شد [۱۲].

$$\alpha_k^{DC} = P_{nmk} (\pi_m - \pi_n) \quad (20)$$

۳-۱-۳- میزان حساسیت هزینه تولید به خروج خط

در مدل AC

به عبارتی α_k نشان‌دهنده نرخ حساسیت تابع هدف نسبت به بودن یا نبودن خط انتقال k است. این شاخص مبتنی بر مدل AC به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳].

$$\alpha_k^{AC} = P_{nmk} (\pi_m^P - \pi_n^P) - P_k^{loss} \pi_m^P + Q_{nmk} (\pi_m^Q - \pi_n^Q) - Q_k^{loss} \pi_m^Q \quad (21)$$

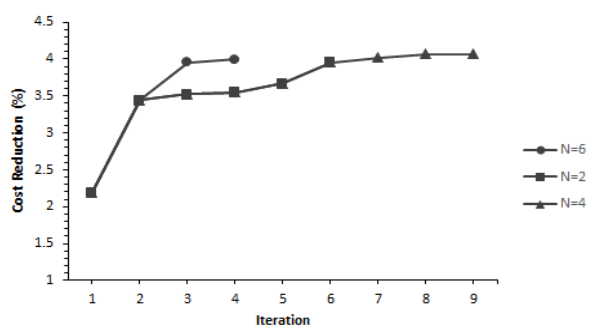
P_k^{loss} ، Q_k^{loss} میزان تلفات اکتیو و راکتیو خط انتقال k است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مدل AC میزان تلفات توان اکتیو و راکتیو خط انتقال k نیز بر روی این شاخص تأثیرگذار خواهد بود. هر چه میزان شاخص α_k برای خط k بیشتر باشد اولویت این خط برای خروج بیشتر است.

۴- بررسی روش پیشنهادی در یک شبکه نمونه

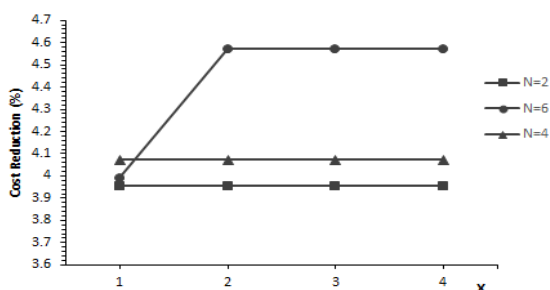
در این قسمت، الگوریتم بیان شده در بخش ۳ بر روی شبکه تست IEEE 118-Bus پیاده سازی شده و نتایج حاصل از آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این شبکه متشکل از ۱۱۸ باس، ۱۸۶ خط انتقال و ۵۴ واحد تولیدی می‌باشد. این شبکه در واقع بخشی از شبکه قدرت ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۶۲ است که به عنوان یک شبکه تست استاندارد در اختیار شرکت‌های برق قرار داده شده بود [۱۵]. به منظور انجام محاسبات پخش بار بر روی این شبکه معمولاً ۱۹ واحد از ۵۴ واحد موجود را قابل تخصیص در نظر می‌گیرند. لازم به ذکر است که در این مقاله خطوط موازی موجود در شبکه اصلی با خطوط معادل جایگزین شده‌اند و در نتیجه تعداد خطوط شبکه به ۱۷۹ عدد کاهش یافته است. رایانه استفاده شده در این ارزیابی دارای مشخصات Intel® Core™ i7 CPU 2.67 GHz Memory 4.00GB است. روش پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف $N=2,4,6$ و

$X=1,2,3$ بر روی شبکه تست پیاده سازی شده و به منظور تشکیل لیست اولویت از شاخص‌های α_k^{DC} و α_k^{AC} استفاده گردیده است. شکل ۲ بهترین درصد کاهش هزینه را در هر تکرار به ازای $X=1$ و مقادیر $N=2,4,6$ با استفاده از پخش بار DC و

ازای مقادیر مختلف N و X در مدل AC نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که در $N=6$ بهترین جواب به ازای $X=2$ نتیجه می‌شود. پس به طور کلی می‌توان گفت در این شبکه تست، حساسیت نسبت به X کمتر از N است. البته در شبکه‌های بزرگ می‌تواند این گونه نباشد و به دلیل زیاد بودن تعداد خطوط حساسیت نسبت به X نیز افزایش یابد که در مطالعات بعدی می‌توان به آن پرداخت.



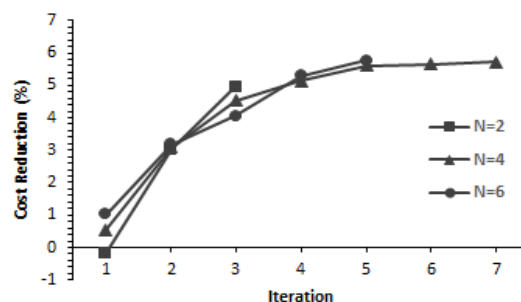
شکل ۳: درصد کاهش هزینه در هر تکرار به ازای $X=1$ در مدل AC



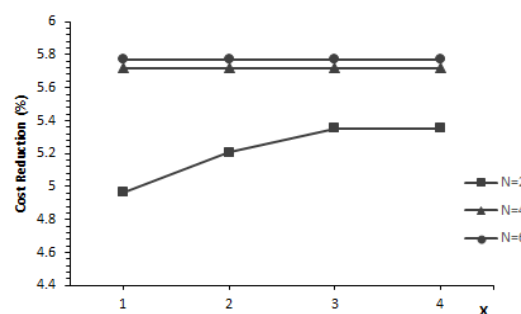
شکل ۴: درصد کاهش هزینه نهایی به ازای مقادیر مختلف X در مدل AC

در جداول ۱ و ۲ تعداد تکرارها، زمان اجرا بر حسب ثانیه و کاهش هزینه بر حسب درصد نسبت به حالت پایه به ازای مقادیر مختلف N و X به ترتیب در مدل‌های DC و AC نشان داده شده است. به منظور ارزیابی دقت جواب بدست آمده از پخش بار DC، بهترین جواب مدل DC در شبکه AC اعمال شده و میزان کاهش هزینه محاسبه گردیده و در ستون سمت راست جدول ۱ آورده شده است. در $N=4$ به ازای مقادیر مختلف X و در $N=2$ به ازای $X=3$ جواب به دست آمده از مدل DC در پخش بار AC همگرا نمی‌شود و قابل اعمال (Feasible) نیست. در حالت‌های دیگر نیز درصد کاهش هزینه، کمتر از مقداری است که در مدل DC نشان می‌دهد. با مقایسه دو جدول ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت در مدل AC به جواب‌های دقیق‌تر و بهتری (درصد کاهش بیشتری) خواهیم رسید، در حالی که زمان محاسبات نیز افزایش چندانی ندارد. جدول ۳ نیز خطوط خارج شده در حالت‌های بهینه مدل‌های DC و AC را نشان می‌دهد.

شاخص α_k^{DC} نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازای $N=2$ تعداد تکرارها بیشتر و درصد کاهش هزینه کمتر است. بنابراین در $X=1$ هر چه N بیشتر باشد با تعداد تکرار کمتری به جواب بهتری می‌رسیم. لازم به ذکر است که حالت $X=1$ معادل با روش هوشمندانه معرفی شده در [۱۲] - [۱۳] است. در روش هوشمندانه ابتدا برای شبکه پایه با توجه به شاخص‌های پرشدگی خطوط انتقال لیست اولویتی تشکیل می‌شود، سپس از بین خطوط کاندیدا با انجام پخش بار بهینه به ازای خروج هر کدام از آن‌ها، کاهش هزینه محاسبه شده و در نهایت یک خط که خروج آن بیشترین کاهش هزینه را منجر می‌شود، انتخاب می‌گردد و به مرحله بعد رفته تا الگوریتم همگرا شود. بنابراین این روش هوشمندانه معادل آن است که در مدل پیشنهادی $X=1$ قرار داده شود. از شکل ۱ می‌توان نتیجه گرفت که روش هوشمندانه به ازای N های بزرگ مناسب خواهد بود. شکل ۲ درصد کاهش هزینه نهایی بدست آمده به ازای مقادیر مختلف X و N را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در N های بزرگتر حساسیت نسبت به X کم است و با افزایش X به جواب بهتر نرسیده و تنها زمان محاسبات بیشتر می‌شود.



شکل ۱: درصد کاهش هزینه در هر تکرار به ازای $X=1$ در مدل DC



شکل ۲: درصد کاهش هزینه نهایی به ازای مقادیر مختلف X در مدل DC

شکل‌های ۳ و ۴ بر اساس پخش بار AC و شاخص α_k^{AC} به دست آمده‌اند. از شکل ۳ که معادل با روش هوشمندانه است، ملاحظه می‌شود که در مدل AC نیز به ازای N بزرگتر با تکرار کمتر به جواب بهتر می‌رسیم. از شکل ۴ که کاهش هزینه را به

این روش (X و N) می‌باشد. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی جهت دستیابی به اهداف مورد نظر، نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر شبکه نمونه IEEE 118-Bus ارائه گردید. این نتایج نشان می‌دهد که می‌توان به ازای انتخاب N و X مناسب، در زمان کم به درصد کاهش هزینه خوبی رسید.

مراجع

- [1] G. Granelli, et.al., "Optimal network reconfiguration for congestion management by deterministic and genetic algorithms," *Electric Power Systems Research*, vol.76, no. 6, pp. 549-556, 2006.
- [2] W. Shao, and V. Vittal. "BIP-based OPF for line and bus-bar switching to relieve overloads and voltage violations," *Power Syst. Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES. IEEE*, 2006.
- [3] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Security enhancement using an optimal switching power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 674-681, May 1990.
- [4] R. Bacher and H. Glavitsch, "Loss reduction by network switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 447-454, May 1988.
- [5] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Integrated security control using an optimal power flow and switching concepts," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 782-790, May 1988.
- [6] R. Bacher and H. Glavitsch, "Network topology optimization with security constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 103-111, Nov. 1986.
- [7] R. P. O'Neill, R. Baldick, U. Helman, M. H. Rothkopf, and W. Stewart, "Dispatchable transmission in RTO markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 171-179, Feb. 2005.
- [8] Fisher, E. Bartholomew, Richard P. O'Neill, and Michael C. Ferris, "Optimal transmission switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1346-1355, 2008.
- [9] Hedman, Kory W., et al. "Optimal transmission switching with contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1577-1586, 2009.
- [10] Khanabadi, Mojtaba, Hassan Ghasemi, and Meysam Doostizadeh. "Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 542-550, 2013.
- [11] 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, Aug. 2012.
- [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] M. Soroush, and 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, 2014.
- [14] J. Wu, and K. W. Cheung. "On selection of transmission line candidates for optimal transmission switching in large power networks," *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE*, pp. 1-5, 2013.
- [15] Power Systems Test Case Archive, Dept. Elect. Eng., Univ. Washington, accessed Mar. 21, 2011. [Online]. Available: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/index.html>.

جدول ۱: جواب‌های نهایی به ازای مقادیر مختلف N و X در DC

	X	تعداد تکرارها	زمان اجرا	کاهش هزینه (DC)	کاهش هزینه (AC)
N=2	۱	۳	۵/۱۰۴	۴/۹۶۵۴۱	۳/۹۵۷۵
	۲	۴	۶/۸۸۱	۵/۲۰۵۶۸	۱/۹۰۵۴
	۳	۵	۱۰/۶۶۲	۵/۳۵۴۲۱	-
N=4	۱	۷	۱۱/۲۱۰	۵/۷۱۹۵۴	-
	۲	۷	۱۷/۵۰۶	۵/۷۱۹۵۴	-
	۳	۷	۲۲/۴۴۸	۵/۷۱۹۵۴	-
N=6	۱	۵	۱۷/۸۶۳	۵/۷۷۲۰۸	۱/۶۷۷۵
	۲	۵	۲۶/۵۹۰	۵/۷۷۲۰۸	۱/۶۷۷۵
	۳	۵	۴۷/۹۷۷	۵/۷۷۲۰۸	۱/۶۷۷۵

جدول ۲: جواب‌های نهایی به ازای مقادیر مختلف N و X در مدل AC

	X	تعداد تکرارها	زمان اجرا	کاهش هزینه (AC)
N=2	۱	۶	۷/۷۷۲	۳/۹۵۴۲۳
	۲	۶	۱۱/۵۷۵	۳/۹۵۴۲۳
	۳	۶	۱۴/۵۱۷	۳/۹۵۴۲۳
N=4	۱	۹	۲۰/۵۱۵	۴/۰۷۲۴۸
	۲	۹	۲۹/۷۵۲	۴/۰۷۲۴۸
	۳	۹	۳۶/۲۰۳	۴/۰۷۲۴۸
N=6	۱	۴	۱۸/۳۱۹	۳/۹۹۱۹۳
	۲	۱۱	۴۶/۶۸۱	۴/۵۷۰۴۲
	۳	۱۱	۶۲/۱۸۰	۴/۵۷۰۴۲

جدول ۳: خطوط خارج شده در مدل‌های DC و AC

X	خطوط خارج شده	
	DC	AC
N=2	۱	۹۸-۷۴-۹۲
	۲	۹۸-۷۴-۹۲-۱۰۳
	۳	۹۸-۷۴-۹۲-۱۰۳-۱۱۴
N=4	۱	۶۶-۹۸-۹۲-۷۴-۷۰
	۲	۶۶-۹۸-۹۲-۷۴-۷۰
	۳	۶۶-۹۸-۹۲-۷۴-۷۰
N=6	۱	۹۸-۹۲-۱۲۳-۷۷-۷۵-۷۴
	۲	۹۸-۹۲-۱۲۳-۷۷-۷۵-۷۴
	۳	۹۸-۹۲-۱۲۳-۷۷-۷۵-۷۴

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای حل مسأله کلیدزنی بهینه خطوط انتقال ارائه شد. در این روش به دلیل فراهم بودن امکان استفاده از پخش بار AC، مدل‌سازی قیودی که در مدل‌های DC از آنها صرف نظر می‌شود، میسر می‌باشد. از جمله مزایای عمده این روش، امکان برقراری مصالحه بین میزان کاهش زمان اجرای مسأله کلیدزنی بهینه و حفظ گستردگی فضای جستجو، به کمک تنظیم پارامترهای موجود در