

برنامه‌ریزی خطی مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی، برای بهبود پایایی شبکه‌های توزیع هوشمند

عباس شه‌بازیان^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علیرضا فریدونیان^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران - Ashahbazian@email.kntu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران- fereidunian@eed.kntu.ac.ir

چکیده: دستیابی به حد مناسبی از پایایی در سیستم توزیع انرژی الکتریکی، یکی از اهداف حرکت به سوی شبکه‌های توزیع هوشمند است. یکی از ویژگی‌های مهم شبکه هوشمند، توانایی خودترمیمی در این شبکه‌ها می‌باشد. کلیدهای کنترلی با توجه به عملکردی که دارند، موجب بهبود خودترمیمی و در نهایت افزایش دسترس‌پذیری، آمادگی و پایایی سیستم می‌شوند. لذا به‌کارگیری این تجهیزات در شبکه‌های الکتریکی از اهمیت بالایی برخوردار است. مشارکت اصلی این مقاله با توجه به اهمیت مدل‌سازی خطی مسائل برای نیل به بهینه مطلق، ارائه یک فرمول‌بندی نوین برنامه‌ریزی خطی برای مسئله مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی (کلید کنترل از راه دور و دستی) و ارائه سناریوهای مختلف برای مشخص کردن بهترین انتخاب نوع کلیدها و آرایش کلیدها در برنامه‌ریزی‌های شبکه توزیع، به‌صورت پایایی‌محور است. از طرفی، با تحلیل حساسیت نسبت به بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه و ضریب حساسیت تعریف‌شده در تابع هدف، که دو بخش تابع هدف را وزن‌دهی می‌کند، تحلیل جامعی از نحوه به‌کارگیری کلیدها در شبکه توزیع ارائه شده است. تابع هدف انتخاب‌شده برای این مسئله دو بخش دارد که هر بخش توسط ضریب تنظیم به‌صورت یکایی در تابع هدف مشارکت داده شده‌اند. بخش اول تابع هدف شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه قطعی مشترکین، هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات است و بخش دوم تابع هدف شاخص پایایی سایدی (میانگین تداوم وقفه) است. نتایج برنامه‌ریزی ارائه‌شده در مقاله، اهمیت خطی بودن مسئله مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی را در شبکه توزیع نشان می‌دهد. در حل برنامه‌ریزی خطی مطرح‌شده از حل‌کننده سیپلکس استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی خطی، شبکه توزیع هوشمند، کلید کنترل از راه دور، کلید کنترل دستی، سیمپلکس، پایایی.

Optimal placement and location of automatic and manual switches through linear programming to improve smart distribution systems reliability

A. Shahbazian¹, MSc student; A. Fereidunian², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran,
E-mail: Ashahbazian@email.kntu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran,
E-mail: fereidunian@eed.kntu.ac.ir

Abstract: Achieving an appropriate level of reliability in electrical distribution systems is one of the main goals toward smart distribution grid. Moreover, self-healing is a significant features of smart distribution grid. Self-healing can be improved through installation of remote-controlled switches, which leads to an increase in availability and reliability. Thus, it is important to install controllable equipment in distribution grid. In this paper, a mixed integer linear program (MIP) is introduced to allocate remote-controlled and manual switches. In addition, reliability-centered approach is considered to find the best arrangement of switches in distribution grid. A sensitivity analysis is conducted on maximum investment cost, leads to a comprehensive analysis on installation of switches in distribution grid. Moreover, the objective function includes investment cost, customer interruption cost and maintenance cost. The formulation is solved by CPLEX solver.

Keywords: Linear Programming, smart Distribution Grids, remote-Controlled Switches, manual Controlled Switches, CPLEX, reliability.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۸ و ۱۳۹۶/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵

نام نویسنده مسئول: علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده مسئول: تهران، خ شریعتی، پل سیدخندان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۱. مقدمه

امروزه شبکه‌های توزیع، سهم بسزایی در هدررفت انرژی الکتریکی دارند [۱]. از این رو رویکرد بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه انرژی‌های الکتریکی، به شبکه‌های توزیع معطوف شده است زیرا که بخش قابل توجهی از وقفه‌های سیستم قدرت را شامل می‌شود. شبکه‌های هوشمند که قابلیت خودترمیمی دارند، به‌عنوان راه‌کاری هوشمندانه جهت برون‌رفت از این مشکل مطرح گردیده است [۲]. مکان‌یابی بهینه و توسعه سیستم‌های کنترلی، می‌تواند باعث بهبود خودترمیمی و درنهایت بهبود پایایی شبکه توزیع هوشمند گردد [۳]. کلیدها که به دو صورت کنترل از راه دور و دستی هستند به‌عنوان تجهیزات کنترلی شبکه، موجب ایزوله شدن محل خطا، کاهش ناحیه خاموشی و امکان برق‌رسانی از فیدر مجاور یا خود فیدر را به بارهای خارج از محدوده خاموشی فراهم می‌سازند [۳]. همچنین می‌توان توسط منابع تولید پراکنده بارهای منقطع را تغذیه کرد [۴]. لذا با توجه به محدودیت سرمایه‌گذاری که برای خرید و نصب این تجهیزات وجود دارد، محل قرارگیری بهینه این تجهیزات در شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است.

مسئله مکان‌یابی تجهیزات کنترلی در سیستم‌های توزیع الکتریکی امری ضروری و غیرقابل‌انکار است. به‌همین‌منظور تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. مرجع [۵] مدلی غیرخطی برای مکان‌یابی کلیدهای کنترلی، کلیدهای مانور، فیوزها و مدارشکن‌ها ارائه داده و به بهینه‌سازی مسئله با الگوریتم ازدحام ذرات پرداخته است. در مرجع [۶] الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای مسئله مکان‌یابی هم‌زمان کلیدهای کنترل از راه دور و دستی مقایسه شده است. در این مرجع احتمال عملکردی تجهیزات در نظر گرفته شده است و مطالعه‌ای بر روی شاخص‌های پایایی انجام نشده است و تنها محاسبات اقتصادی مدنظر قرار گرفته شده است. در مرجع [۷] مدلی غیرخطی به‌منظور جایابی کلیدهای اتوماتیک با درنظرگرفتن محدودیت‌های پخش توان انجام شده است. تابع هدف این مسئله شامل هزینه وقفه مشترکین، هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و شاخص پایایی می‌باشد که با استفاده از الگوریتم آبکاری فولاد بهینه‌سازی شده است. در مرجع [۸] به‌منظور جایابی کلیدهای کنترل از راه دور و دستی مدلی غیرخطی ارائه شده است، در این مدل تابع هدف شامل هزینه وقفه و هزینه سرمایه‌گذاری است که نرخ خرابی کلیدها و زمان تعمیر کلیدها نیز در نظر گرفته شده است. در مرجع [۹] مسئله مکان‌یابی کلیدها صورت گرفته است با این فرض که به‌هنگام بازآرایی از منابع تولید پراکنده انرژی و حرارت بهره‌برده است. تابع هدف این مرجع به‌منظور حداقل کلیدگذاری جدید، حداقل تعداد کلیدزنی، تغذیه حداکثر بارهای با اولویت در حالت جزیره‌ای و تغذیه حداکثر کل بارها در حالت جزیره‌ای که با الگوریتم گراف بهینه‌سازی شده است. در مرجع [۱۰] تعداد و محل ادوات حفاظتی مانند ریکلوزر و فیوز با درنظرگرفتن تابع هدف

اقتصادی و محدودیت‌های فنی شامل ولتاژ و جریان، مشخص شده است. در این مطالعه، مسئله مکان‌یابی تجهیزات حفاظتی نامبرده به‌صورت هم‌زمان با مسئله مکان‌یابی کلیدهای قطع بار قابل کنترل از راه دور و با استفاده از روش جستجوی ممنوعه (الگوریتم تابو) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۱] مسئله مکان‌یابی هم‌زمان تجهیزات کنترلی و فیوزها با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان چند هدفه مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۲] جایابی کلیدها را بدون در نظر گرفتن نوع این کلیدها و با یک تابع هدف غیرخطی ارائه داده است و توسط الگوریتم مورچگان بهینه‌سازی شده است. در مرجع [۱۳] به‌منظور بهبود شاخص‌های پایایی شبکه و با تعریف تابع هدفی از جنس پایایی و استفاده از الگوریتم سلسله مراتبی، مکان‌یابی کلیدهای اتوماتیک انجام شده است. در مرجع [۱۴] بهینه‌سازی کلاسیک تابع هدف از جنس هزینه، با ارائه رویکرد تجزیه دومارحله‌ای (تقسیم فضای راه‌حل به زیرفضاهای مستقل، و پس از آن حل مسائل بهینه‌سازی در هر فضا) و استفاده از یک الگوریتم ساده و مؤثر برای تقسیم فضای راه‌حل به زیرفضاهای مستقل کوچک‌تر، برای مکان‌یابی کلیدهای اتوماتیک انجام شده است. در مرجع [۱۵] از الگوریتم ایمنی بدن برای بهینه‌کردن تابع هدف هزینه که مکان‌یابی کلیدهای دستی و اتوماتیک را منجر می‌شود استفاده شده است. در مرجع [۱۶] الگوریتم کلونی مورچگان برای مکان‌یابی کلیدهای دستی در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با وزن‌دهی فازی (چندهدفه فازی) حداقل‌سازی هزینه کلیدها و بهبود پایایی انجام شده است. در مرجع [۱۷] الگوریتم حریم‌ها برای جایابی کلیدهای کنترل از راه دور با تابع هدف غیرخطی شامل هزینه قطعی، هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری استفاده شده است. در مرجع [۱۸] الگوریتم ژنتیک برای جایابی کلیدهای دستی با درنظرگرفتن انرژی بازایی شده به‌هنگام رخداد خطا به‌عنوان تابع هدف استفاده شده است. در مرجع [۱۹] تعداد و مکان بهینه کلیدها با یک روش سه‌حالتی توسعه‌یافته با الهام از الگوریتم ازدحام ذرات و تابع هدفی از جنس هزینه مشخص شده است. در مرجع [۲۰] برنامه‌ریزی خطی به‌صورت چندمرحله‌ای برای حل مسئله مکان‌یابی کلیدهای کنترل از راه دور ارائه شده است. در این مرجع دوره مطالعه به چند زیربخش تقسیم شده و هزینه اولیه سرمایه‌گذاری هر زیربخش از سود حاصل زیربخش ماقبل مشخص می‌شود. مدل ارائه‌شده در این مرجع تنها در صورت استفاده از یک نوع کلید خطی بوده و امکان نوع‌سنجی کلیدها فراهم نمی‌شود. تابع هدف در نظر گرفته شده از نوع هزینه و شامل هزینه خرید و نصب کلیدها، هزینه نگهداری کلیدها و هزینه قطعی مشترکین است.

در مرجع [۲۱] برنامه‌ریزی خطی برای مسئله مکان‌یابی کلیدهای کنترل از راه دور، با در نظر گرفتن هزینه‌های خاموشی مشترک، هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و بهره‌برداری انجام شده است. برنامه‌ریزی صورت‌گرفته در این مرجع تنها قادر به مکان‌یابی یک نوع کلید بوده و

در بخش دوم این مقاله مدل‌سازی ریاضی مسئله به‌صورت یک برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است و با ارائه فلوجارت در شکل ۱ مراحل مدل‌سازی تشریح شده است. در بخش سوم نتایج نوع‌سنجی و مکان‌سنجی کلیدها مطرح شده و با تحلیل حساسیت نسبت به بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه و پایایی مورد انتظار مورد بحث و نقد قرار گرفته است. در ادامه، کارآمدی و اثربخشی مدل ارائه‌شده با مدل غیرخطی مرجع [۶] مقایسه شده و در بخش چهارم مقاله، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری شده است.

۲. مدل‌سازی ریاضی مسئله

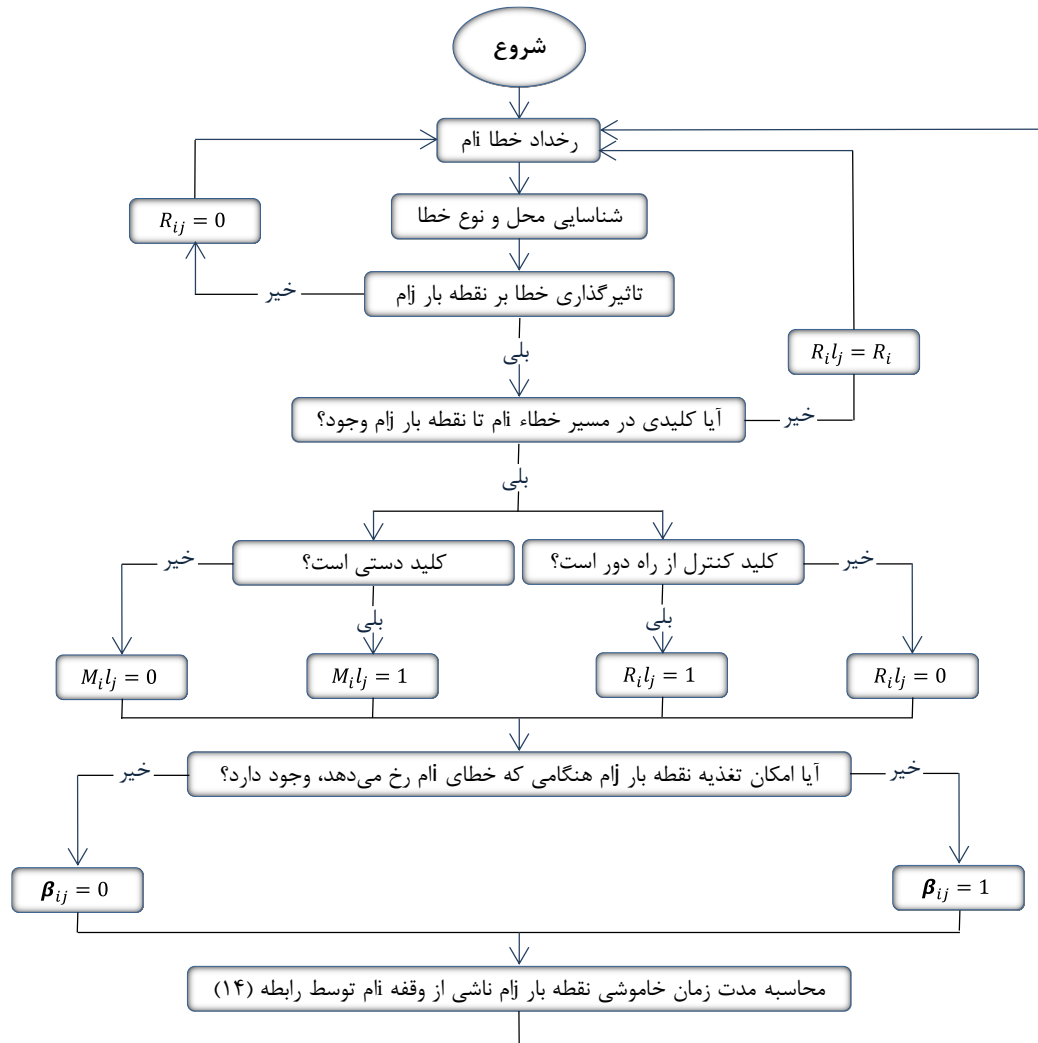
هدف مسأله مکان‌یابی و نوع‌سنجی تجهیزات کنترلی شبکه توزیع مشخص کردن مکان و نوع این تجهیزات در شبکه به‌منظور تحقق هدف و یا اهداف بهره‌بردار شبکه می‌باشد. بنابراین تابع و یا توابع هدف این مسئله، می‌تواند شاخص و یا شاخص‌های فنی، پایایی، اقتصادی و حتی ترکیبی از این موارد باشد. در این مطالعه، تابع هدف اقتصادی که مشتمل بر هزینه تجهیزات نصب‌شده و هزینه خاموشی مشترکین در طول دوره مورد مطالعه (۱۵ سال [۶])، انتخاب شده است. بنابراین مسئله مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی در قالب یک برنامه‌ریزی خطی با استفاده از روابط (۱-۹) مدل‌سازی می‌شود.

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در رابطه (۱)، شامل هزینه‌های ناشی از خرید و نصب تجهیزات، هزینه خاموشی مشترکین و هزینه نگهداری و تعمیرات در طول دوره مورد مطالعه می‌باشد. عبارت اول رابطه (۱) بیانگر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، شامل هزینه خرید و نصب کلیدهای کنترل از راه دور و دستی است. عبارت دوم رابطه (۱) بیانگر ارزش کنونی هزینه تعمیرات تجهیزات و هزینه‌های ناشی از خاموشی مشترکین (این هزینه شامل هزینه انرژی توزیع نشده و جریمه ناشی از خاموشی است که توسط شرکت توزیع به مشترکین مختلف داده می‌شود). در طول دوره مورد مطالعه می‌باشد. هزینه تعمیرات، نگهداری و قطعی بارها که در سال‌های بهره‌برداری مورد انتظار است، توسط رابطه (۲) به ارزش کنونی برگردانده شده‌اند [۳۳]. رابطه (۲) ارزش کنونی یک سرمایه در سال t ام را به سال اول، با استفاده از نرخ ظاهری بیان می‌کند. نرخ ظاهری با توجه به نرخ بهره و نرخ تورم در هر سال، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳۳]. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیرات به‌ترتیب از روابط (۴،۵) محاسبه می‌شود. هزینه خاموشی تمامی نقطه بارهای شبکه در سال با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده است. این هزینه از مجموع هزینه خاموشی مشترکین هر نقطه بار در سال، که از رابطه (۷) حساب می‌شود به دست می‌آید. هزینه خاموشی هر مشترک با توجه به مدت زمان قطعی که آن مشترک از کلیه خطاهای شبکه تجربه می‌کند به دست می‌آید. تابع هزینه قطعی مشترکین به‌وسیله دو معادله خطی برای زمان‌های بین صفر تا $1/7$ ساعت ($f_0^{1.7}(R_j^T)$) و $1/7$ تا ۶ ساعت ($f_{1.71}^6(R_j^T)$) در نظر گرفته شده است.

در صورت استفاده از دو کلید قادر به حل مسئله به‌صورت خطی نخواهد بود. مرجع [۲۲] جایابی ریکلوزر و کلیدها را با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارها، خطاها و زمان تعمیر انجام داده است. مدل ارائه‌شده در این مرجع به‌صورت یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح بوده و با روش بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی حل شده است. مرجع [۲۳] مدل غیرخطی، برای بهینه‌سازی چندهدفه مسئله جایابی کلیدها با به‌کارگیری الگوریتم ازدحام ذرات ارائه داده است. مدل ارائه‌شده به‌جای یک جواب، مجموعه‌هایی از جواب‌ها، برای برنامه‌ریزی‌های مختلف شبکه ارائه داده است. در ضمن مدل ارائه‌شده تنها با دانستن شکل شبکه و تعداد مشترکین در هر نقطه بار نتایج را ارائه می‌دهد.

مرجع [۲۴] از الگوریتم جهش قورباغه برای یافتن مکان بهینه کلیدهای دستی و اتوماتیک در شبکه توزیع اتوماسیون یافته استفاده می‌کند. تابع دوهدفه برای این الگوریتم شامل: ۱. بهبود پایایی و کمینه‌سازی هزینه‌های وقفه مشترکین ۲. کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیرات؛ به‌صورت غیرخطی ارائه شده است. در مرجع [۲۵] مسئله جایابی کلیدها مبتنی بر اصل بهینه‌سازی بلمن حل شده است. طبق این اصل چندین فاز تصمیم‌گیری تعریف می‌شوند و زمانی پاسخ بهینه حاصل می‌گردد که کلیه فازها بهینه گردند. مجموع هزینه سرمایه‌گذاری، نگهداری و انرژی توزیع نشده به‌عنوان تابع هدف مطرح شده است. در مرجع [۲۶] مطالعه‌ای برای مکان‌یابی کلیدهای اتوماتیک در شبکه توزیع، با در نظر گرفتن شاخص‌های سایفی، سایدی و انرژی تأمین نشده، انجام شده و از الگوریتم ایمنی بدن برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده کرده‌است. در مرجع [۲۷] الگوریتم دومرحله‌ای برای تغییر مکان کلیدها و دستیابی به بهترین مقدار تابع هدف (خسارت مشترکین ناشی از عدم برق‌رسانی) روی هر فیدر ارائه شده و توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌سازی شده است. مرجع [۲۸] به‌کارگیری کلیدها را در شبکه توزیع با مدلی غیرخطی برای تأمین نیمه‌خودکفای بودجه اتوماسیون از سود حاصله ارائه کرده‌است. با توجه به مطالعات صورت پذیرفته، در اکثر مقالات، مدل‌سازی به‌صورت غیرخطی بوده و اکثراً با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به حل مسئله پرداخته‌اند. شایان ذکر است که جواب‌های حاصل از الگوریتم‌ها یا در واقع مدل‌سازی‌های غیرخطی، تضمین نیل به پاسخ بهینه مطلق را میسر نمی‌سازند.

در این مقاله، یک برنامه‌ریزی خطی جهت تضمین نیل به پاسخ بهینه مطلق در مسئله مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی ارائه شده است. نوع‌سنجی کلیدها توسط سه سناریو مختلف شامل ترکیب‌های مختلفی از کلیدها ارائه شده است. با توجه به نتایج این سناریوها می‌توان بهترین ترکیب از نوع کلیدها را برای مسئله مکان‌سنجی کلیدها انتخاب کرد. برای مکان‌یابی کلیدها در شبکه تابعی متشکل از مجموعه هزینه‌ها (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیرات و هزینه ناشی از وقفه مشترکین) به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی انتخاب شده است.



شکل ۱: فلوچارت محاسبه مدت زمان خاموشی هر نقطه بار

$$At + 1 = (1 + Inf) \square (1 + Int) \quad (۳)$$

$$C^{Inv} = N^{Rcs} \square C_{Rcs}^{Inv} + N^{Ms} \square C_{Ms}^{Inv} \quad (۴)$$

$$C^M = N^{Rcs} \square C_{Rcs}^M + N^{Ms} \square C_{Ms}^M \quad (۵)$$

$$CIC_{Total}^{Cost} = \sum_{j=1}^{n_c} CIC_j^{Cost} \quad (۶)$$

$$CIC_j^{Cost} = C_j \square F_0^{1/7} (R_j^T) + (1 - C_j) \square F_{1/71}^6 (R_j^T) \quad (۷)$$

$$C_j \geq (1 - \frac{R_j^T}{1.71}) \quad (۸)$$

$$F_i^{L_j} \leq F_{h_i} \square \hat{R}_{ij} \quad (\hat{R}_{ij} \square R_{ij}) \quad (۹)$$

$$F_i^{L_j} \leq R_{ij}$$

$$F_i^{L_j} \geq R_{ij} - (1 - F_{h_i}) \square \hat{R}_{ij}$$

$$F_i^{L_j} \geq 0$$

تأثیر هریک از این توابع با یک متغیر باینری مشخص می‌شود. این متغیر باینری در رابطه (۸) مقدار می‌پذیرد. رابطه (۷) همچنان یک رابطه غیرخطی ناشی از ضرب یک متغیر باینری در یک متغیر پیوسته است که توسط روابط (۹) خطی شده و گسترش داده می‌شود. روابط (۹) خطی‌سازی ضرب یک متغیر باینری F_{h_i} با یک متغیر پیوسته R_{ij} را منجر می‌سازند [۲۹]. مدت زمان خاموشی سالیانه هر نقطه بار (رابطه (۱۰)) از مجموع کلیه مدت زمان‌های خاموشی سالیانه خطاهای مختلف شبکه بر نقطه بار مذکور به دست می‌آید. رابطه (۱۱) مدت زمان خاموشی بار نام ناشی از خطای نام را نتیجه می‌دهد. نرخ خطا در بار نام از مجموع نرخ خطاهای کلیه خطاهای شبکه حاصل می‌گردد. مدت زمان خاموشی نقطه بار نام از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$C^T = C^{Inv} + \sum_{t=1}^{n_t} PW_t \square (C^M + CIC_{Total}^{Cost}) \quad (۱)$$

$$PW_t = \left(\frac{1}{1 + At} \right)^t \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &\leq R_2^U \\ Z_1 &\geq M_6^D + R_2^U - 1 \\ C^{Inv} &\leq C_B^{Inv} \end{aligned} \quad (22)$$

$$SAIDI^{total} = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} U_j \square N_j}{\sum_{j=1}^{n_j} N_j} \quad (23)$$

رابطه (۱۴) متغیر باینری β_{ij} مشخص‌کننده قابلیت تأمین بار منقطع ژام ناشی از وقفه‌آم توسط فیدر مجاور یا خود فیدر است. مقدار این متغیر از پخش بار خطی ارائه‌شده در مراجع [۳۰، ۳۱]، بر روی شبکه نمونه اولیه به‌دست‌آمده و در مسئله مکان‌یابی به‌صورت یک ماتریس معلوم وارد می‌شود. این پخش بار با توجه به توپولوژی شبکه در شرایط رخداد کلیه خطاها قبل از حل مسئله مکان‌یابی انجام‌شده و خروجی آن به‌صورت یک ماتریس معلوم در مسئله وارد می‌شود. لازم به ذکر است که در مسئله پخش بار تمامی قیود ولتاژی و جریان‌ی شبکه در نظر گرفته شده است.

رابط (۱۷-۱۵) در واقع بیان‌کننده وجود $(M_i^{L_j} = 1)$ یا عدم وجود $(M_i^{L_j} = 0)$ کلید دستی بر مسیر خطا تا نقطه بار مربوطه می‌باشند. به‌عنوان مثال $M_1^{L_5} = 1$ نشان‌دهنده وجود حداقل یک کلید دستی بر مسیر خطای ۱ به نقطه بار ۵ شبکه می‌باشد و اگر این مقدار برابر صفر باشد کلید دستی در این مسیر وجود ندارد. در روابط (۱۵-۲۰) اندیس k نشان‌دهنده یکی از نقاط کاندید کلیدها می‌باشد و اندیس‌های k_1 و k_2 به‌ترتیب نمایانگر نقاط کاندید کلیدها در انتها و ابتدای خطوط از محل رخداد خطا تا مکان ماقبل کلید k می‌باشند. روابط (۲۰-۱۸) نیز ماهیتی همانند روابط (۱۷-۱۵) دارند با این تفاوت که وجود یا عدم‌وجود کلیدهای کنترل از راه دور را بیان می‌کنند. رابطه (۲۲) بیانگر محدودیت سرمایه‌گذاری اولیه در شبکه می‌باشد، این سرمایه‌گذاری شامل هزینه خرید و نصب تجهیزات برگزیده در شبکه می‌باشد. توسط رابطه (۲۳) میانگین تداوم وقفه هر نقطه بار (سایدی) محاسبه می‌شود. برای معروضه‌ای مجموعه هزینه‌های شبکه و پایایی مورد انتظار شبکه محدودیت حداقل مقدار سایدی شبکه در مسئله واردشده و توسط رابطه (۲۴) تعریف می‌شود.

$$SAIDI^{total} \leq SAIDI^{min} \quad (24)$$

۳. نتایج نوع‌سنجی و مکان‌سنجی کلیدها

برنامه‌ریزی‌های ارائه‌شده بر روی شبکه نمونه روی بیلبنتون شکل ۲ انجام شده است [۳۲]. اطلاعات تکمیلی بارها و شبکه در مراجع [۶، ۳۲] در دسترس است. احتمالات عملکردی کلیدها و هزینه‌های هر کلید در جدول ۱ مشخص شده است. در این مطالعه خطاهای ترانس، خطوط، باس‌بارها و انشعاب‌ها در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲ هر فیدر از طریق حداقل یک فیدر مجاور امکان پشتیبانی تغذیه

در مدل‌سازی ریاضی یک شبکه برای تحلیل پایایی، مهم‌ترین بخش آن به دست آوردن تداوم هر وقفه برای هر نقطه بار باشد. در این مقاله توسط رابطه (۱۴) و روابط (۱۵-۲۰) شبکه مدل‌سازی شده و با توجه به توپولوژی شبکه و روابط خطی‌سازی (۲۱) مدل ریاضی خطی شده برای شبکه حاصل می‌گردد. شکل ۱ استراتژی محاسبه مدت زمان وقفه هر نقطه بار را ناشی از خطاهای مختلف شبکه نشان می‌دهد.

در رابطه (۱۴) تداوم وقفه آم بر نقطه بار ژام قابل محاسبه است. در این رابطه متغیرهای باینری کمکی $M_i^{L_j}$ و $R_i^{L_j}$ به‌ترتیب مشخص‌کننده وجود کلید دستی و کنترل از راه دور بر مسیر از خطای آم تا نقطه بار ژام می‌باشد. این متغیرها توسط مجموعه قیود نشان داده‌شده در روابط (۱۵-۲۰) محاسبه می‌شود. البته باید توجه داشت که این روابط که براساس توپولوژی شبکه به دست می‌آیند غیرخطی بوده‌اند و ترم غیرخطی در این روابط حاصل‌ضرب دو عدد باینری است که با استفاده از روابط خطی‌سازی ضرب دو متغیر باینری (مجموعه روابط (۲۱)) خطی‌سازی می‌شوند [۲۹].

در مجموعه روابط (۱۹) Z_1 بیان‌کننده ضرب دو متغیر M_6^D و R_2^U می‌باشد و مادامی که ضرب این دو متغیر در رابطه‌ای ظاهر گردد Z_1 جایگزین آن می‌شود.

$$U_j = \sum_{i=1}^{n_f} U_i^{L_j} \quad (10)$$

$$U_i^{L_j} = R_{ij} \square \lambda_i^{L_j} \quad (11)$$

$$\lambda_j^T = \sum_{i=1}^{n_f} \lambda_i^{L_j} \quad (12)$$

$$R_j^T = \frac{U_j^T}{\lambda_j^T} \quad (13)$$

$$R_{ij} = (1 - M_i^{L_j})(1 - R_i^{L_j}) R_i + \dots \quad (14)$$

$$\left\{ R_i^{L_j} \square R_i + P^{RCS} \square (R^{RCS} - R_i) \square R_i^{L_j} \square \beta_{ij} \right\} + \dots$$

$$\left\{ M_i^{L_j} \square R_i + P^{MS} \square (R^{MS} - R_i) \square M_i^{L_j} \square \beta_{ij} \right\}$$

$$M_i^{L_j} \geq M_k^D \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - R_{i-D_k}^{M-U}) \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - R_{i-D_k}^{M-D}) \quad (15)$$

$$M_i^{L_j} \geq M_k^U \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - R_{i-U_k}^{M-U}) \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - R_{i-U_k}^{M-D}) \quad (16)$$

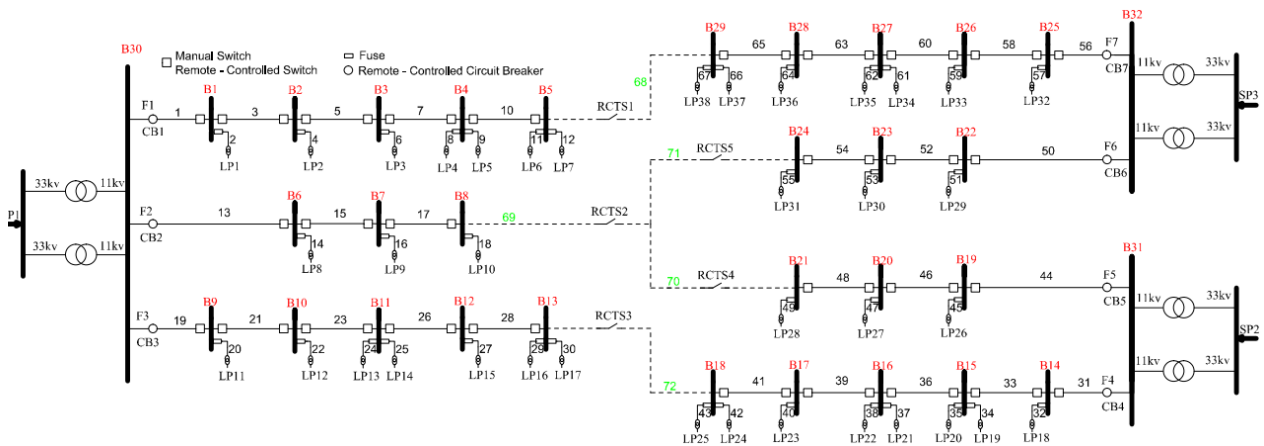
$$M_i^{L_j} \leq \sum_k M_k^U + M_k^D \quad (17)$$

$$R_i^{L_j} \geq R_k^D \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - M_{i-D_k}^{M-U}) \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - M_{i-D_k}^{M-D}) \quad (18)$$

$$R_i^{L_j} \geq R_k^U \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - M_{i-U_k}^{M-U}) \square \prod_{K=1}^{n_k} (1 - M_{i-U_k}^{M-D}) \quad (19)$$

$$R_i^{L_j} \leq \sum_k R_k^U + R_k^D \quad (20)$$

$$Z_1 \leq M_6^D \quad (21)$$

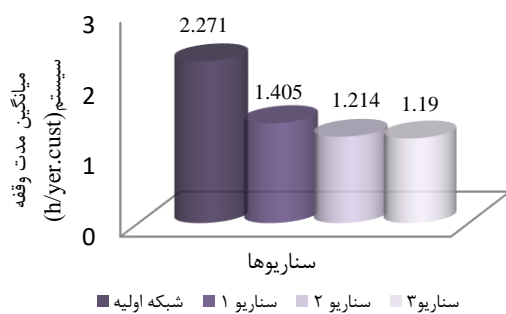


شکل ۲: شبکه مورد مطالعه [۳۲]

دیگر دارد. برای بررسی پایایی شبکه در سناریوها از شاخص سایدی استفاده شده است. نتایج حاصل از درصد کاهش میانگین تداوم وقفه سیستم در هر سناریو در شکل ۳ مشخص شده که سناریو یک با کاهش ۴۷/۶ درصدی بیشترین کاهش را دارد. لذا در کل سناریو سوم بهینه‌ترین تابع هدف را دارد و می‌توان بیان کرد که ترکیب هر دو نوع کلید در مسئله مکان‌یابی بهینه‌ترین شرایط را برای شبکه فراهم می‌آورد هر چند که در بخش بعدی تأثیر میزان هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، بر مسئله مکان‌یابی کلیدها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱: اطلاعات کلیدهای مورد استفاده

نوع تجهیز	هزینه اولیه (دلار)	هزینه سرویس و تعمیرات (دلار)	احتمال عملکرد	مدت زمان عملکرد
کلید کنترل از راه دور	۱۵۰۰۰	۳۰۰	۹۸٪	۳۰ ثانیه
کلید دستی	۶۰۰۰	۱۲۰	۹۷٪	۱ ساعت



شکل ۳: مقایسه میانگین تداوم وقفه در سناریوهای مختلف

۳-۲. تحلیل حساسیت پیشینه سرمایه‌گذاری اولیه

در برنامه‌ریزی سیستم‌های الکتریکی مقدار هزینه سرمایه‌گذاری اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در این مقاله هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌عنوان یک محدودیت در برنامه‌ریزی مسئله بیان شده است.

بارهای منقطع، در صورت رعایت محدودیت‌های ولتاژی و جریان شبکه، در شرایط رخداد خطا در شبکه را دارد. بر روی شکل ۲ مکان کاندید کلیدها مشخص شده است. در شبکه مورد مطالعه بارها ترکیبی از بارهای خانگی، صنعتی، تجاری، عمومی و حساس می‌باشند که هر کدام یک منحنی هزینه وقفه دارند که با دو تابع خطی درجه یک در دو بازه مختلف تقریب زده شده‌اند [۶].

کلیدهای کنترلی مورد استفاده در شبکه‌های الکتریکی از دو نوع اتوماتیک و دستی می‌باشند. انتخاب نوع و مکان این کلیدها در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع بسیار حائز اهمیت است. پارامترهای مختلفی از جمله هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و پایایی مورد انتظار از شبکه، نوع و مکان این کلیدها را در شبکه تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به مدت زمان عملکرد و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه که هر یک از کلیدها دارند، باید یک مدل‌سازی دقیق از شبکه صورت‌گیرد و برنامه‌ریزی جهت انتخاب و آرایش این تجهیزات در شبکه مورد مطالعه انجام پذیرد. برنامه‌ریزی که در این مقاله ارائه شده به‌صورت یک برنامه‌ریزی خطی بوده لذا جواب‌های حاصل از آن نیل به پاسخ بهینه مطلق را تضمین می‌کنند.

۳-۱. نوع‌سنجی کلیدها

برای مشخص شدن اینکه این تجهیزات با چه آرایشی و چه ترکیبی می‌توانند بهترین شرایط بهره‌برداری شبکه را مهیا سازند، سه سناریو مختلف: ۱- مکان‌یابی کلیدهای دستی؛ ۲- مکان‌یابی کلیدهای کنترل از راه دور؛ ۳- مکان‌یابی کلیدهای اتوماتیک و دستی؛ تعریف شده است. نتایج حاصل از سه سناریو در جدول ۲ نشان داده شده است. این نتایج برای پیشینه سرمایه‌گذاری ۱۵۰۰۰۰ دلار می‌باشند. با توجه به نتایج جدول ۲ سناریو یک با تعداد ۱۸ کلید دارای بیشترین زمان تعمیرات در برنامه تعمیرات سالانه می‌باشد. همچنین سناریو دوم با کلید کمترین زمان ممکن را در برنامه تعمیرات دارد. در سناریو سوم با توجه به جدول ۲ که در آن هزینه‌های خاموشی سناریوها مقایسه شده است، هزینه خاموشی مشترکین حدود ۵۱/۶ درصد کاهش یافته که بیشترین مقدار کاهش هزینه را نسبت به سناریوهای

جدول ۲: نتایج نوع‌سنجی کلیدها

مقدار تابع هدف (k\$)	مقدار تابع هدف (k\$)	محل قرارگیری کلیدها		تعداد کلیدها	هزینه سرمایه‌گذاری (k\$)	هزینه وقفه (k\$)	سناریو
		MCS	RCS				
۱۷۱۳	۱۷۱۳	---	---	۰	۰	۰	شبکه اولیه
۱۱۴۹	۱۰۲۹	---	---	۱۸	۱۵۰	۶۸۴	سناریو ۱
۱۰۶۱	۸۹۴	---	---	۱۰	۱۵۰	۸۱۹	سناریو ۲
۱۰۵۲	۸۸۵	---	---	۵	۱۵۰	۸۲۸	سناریو ۳

با سرعت بیشتری امکان‌پذیر می‌شود و بارها خاموشی کمتری را تجربه می‌کنند.

شکل ۴ حساسیت شاخص میانگین تداوم وقفه شبکه (سایدی) را نسبت به سرمایه‌گذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سرمایه‌گذاری اولیه شاخص پایایی مذکور رو به بهبودی است. اما این کاهش در حدی از سرمایه‌گذاری ثابت می‌ماند، دلیل آن نیز تابع هدف در نظر گرفته شده است که در بهینه‌سازی مسئله امکان سرمایه‌گذاری بیش از ۲۰۴۰۰۰ دلار را فراهم نمی‌سازد و این بیشینه سرمایه بهینه‌یابی است که با توجه به تابع هدف و مدل شبکه می‌تواند بهینه‌ترین حالت را برای شبکه مهیا سازد.

هزینه سرمایه‌گذاری از ۳۰۰۰۰ دلار تا ۲۱۰۰۰۰ با پله‌های ۱۵۰۰۰ دلاری انتخاب شده و نتایج حاصله در جدول ۳ گزارش شده است.

تعداد کلیدهای به‌کاررفته در سرمایه‌گذاری‌های مختلف در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به این شکل در سرمایه‌گذاری‌های کم به دلیل مقدار سرمایه‌گذاری کمی که انجام شده است، تعداد کلیدهای دستی بیشتری به‌کار برده شده است تا بتواند در صورت امکان ناحیه بیشتری از شبکه را تحت پوشش قرار دهند. با افزایش سرمایه‌گذاری کلیدهای اتوماتیک بیشتری در شبکه قرار داده می‌شود. دلیل تمایل به کارگیری کلیدهای اتوماتیک در سرمایه‌گذاری‌های بالاتر آن است که این کلیدها سرعت عملکرد بهتری نسبت به کلیدهای دستی دارند. لذا ایزولاسیون محل خطا

جدول ۳: تحلیل بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

تعداد کلیدها	مقدار تابع هدف (k\$)	هزینه وقفه (k\$)	بیشینه سرمایه‌گذاری (k\$)	
			RCS	MCS
۰	۱۳۳۵	۱۳۰۱	۵	۳۰
۰	۱۲۵۹	۱۲۱۲	۷	۴۵
۱	۱۱۹۲	۱۱۲۸	۷	۶۰
۳	۱۱۴۴	۱۰۶۰	۵	۷۵
۳	۱۱۲۱	۱۰۲۴	۷	۹۰
۴	۱۰۹۴	۹۸۱	۷	۱۰۵
۶	۱۰۷۵	۹۴۱	۵	۱۲۰
۷	۱۰۶۳	۹۱۳	۵	۱۳۵
۸	۱۰۵۲	۸۸۵	۵	۱۵۰
۹	۱۰۴۵	۸۶۷	۴	۱۶۵
۱۰	۱۰۳۹	۸۵۲	۳	۱۸۰
۱۱	۱۰۲۷	۸۰۹	۵	۱۹۵
۱۲	۱۰۲۶	۷۹۹	۴	۲۰۴
۱۲	۱۰۲۶	۷۹۹	۴	۲۱۰

جدول ۴: تحلیل حساسیت حداقل پایایی مورد انتظار از شبکه

تعداد کلیدها	میانگین وقفه سیستم (h/year cust)	هزینه وقفه شبکه (k\$)	ضریب وزنی	
			RCS	MCS
۱۰	۱/۰۷۳۴۷	۱۰۴۷	۰/۱	۰
۱۰	۱/۰۷۴۰۹	۱۰۴۳	۰/۲	۰
۸	۱/۱۱۹۹	۹۳۲	۰/۳	۴
۸	۱/۱۱۹۸	۹۱۴	۰/۴	۵
۸	۱/۱۴۰۷	۹۱۲	۰/۵	۴
۸	۱/۱۳۷۹	۸۹۶	۰/۶	۵
۷	۱/۱۶۳۲	۸۹۴	۰/۷	۷
۸	۱/۱۵۷۹	۸۸۸	۰/۸	۵
۸	۱/۱۶۳۱	۸۸۷	۰/۹	۵
۸	۱/۱۷۷۲	۸۸۴	۱	۵

۳-۴. بررسی کارآمدی و اثربخشی مدل‌سازی

مدل‌های غیرخطی نیل به جواب‌های بهینه مطلق را تضمین نمی‌کنند، برای بررسی کارآمدی و اثربخشی مدل‌سازی خطی انجام‌گرفته، مقایسه‌ای با نتایج حاصل در مرجع [۶] صورت گرفته است. این مرجع یک مدل‌سازی غیرخطی ارائه داده و توسط الگوریتم ژنتیک به حل مسئله پرداخته است. با قراردادن کلیدهای مرجع در مدل‌سازی شبکه در مقاله، نتایج جدول ۵ مشخص شده است. با توجه به نتایج مدل غیرخطی از رسیدن به پاسخ بهینه مطلق ناکارآمد بوده و در یک نقطه بهینه محلی جواب مسئله را ارائه داده است. کارآمدی مسئله از آنجا مشخص است که در مدل غیرخطی مقدار سرمایه‌گذاری ۲۳۴۰۰۰ دلار بوده که این مقدار در مدل خطی این مقاله ۲۰۴۰۰۰ دلار بوده و این یعنی با ۱۲/۸٪ سرمایه‌گذاری کمتر به شرایط بهینه‌تری از شبکه از لحاظ کاهش هزینه وقفه‌ها و پایایی شبکه خواهیم رسید.

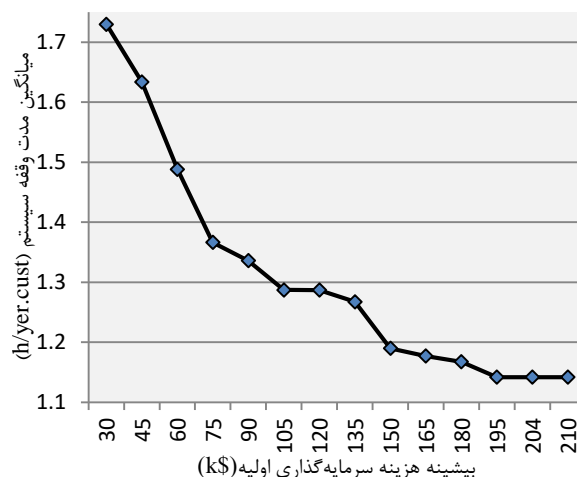
۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترل از راه دور و دستی، با یک برنامه‌ریزی خطی ارائه گردید. نتایج حاصل از نوع‌سنجی کلیدها، استفاده از هر دو نوع کلیدهای کنترل از راه دور و دستی را برای رسیدن به مطلوب‌ترین شرایط سرمایه‌گذاری و شبکه، ملزوم کرد. تحلیل حساسیت بر روی بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری انجام شد و نتایج وابستگی زیاد تعداد و محل قرارگیری کلیدها را به بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری مشخص کردند، هرچند که مشخص شد در یک شبکه افزایش بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری در حدی محدود می‌شود و افزایش بیش از آن نمی‌تواند موجب بهینگی بیشتر تابع هدف گردد.

برای معاضه بین پایایی شبکه و مجموعه هزینه‌ها تابع هدف متشکل از هر دو جزء ارائه شد. با تغییر ضرایب وزنی در تابع هدف مشخص گردید که برای رسیدن به حداقل میانگین تداوم وقفه شبکه به کارگیری کلیدهای کنترل از راه دور به دلیل سرعت عملکردی بالاتر بیشتر شد و با کاهش ضریب وزنی پایایی شبکه کلیدهای کنترلی به دلیل هزینه کمتر نیز مورد استفاده قرار گرفتند. برای بررسی کارآمدی مدل‌سازی ارائه‌شده، مقایسه‌ای با نتایج مرجع [۶] انجام شد. نتایج این مقایسه ناکارآمدی مدل غیرخطی را به نیل پاسخ بهینه مطلق نشان می‌دهند. همچنین مشخص شد که با استفاده از مدل‌سازی خطی این مقاله نسبت به مدل‌های غیرخطی با هزینه کمتری بهینه‌ترین شرایط برای شبکه مهیا خواهد شد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از همفکری اعضای هیئت تحریریه مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز کمال سپاس‌گزاری را دارند.



شکل ۴: حساسیت میانگین وقفه مشترکین به بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

۳-۳. تحلیل حساسیت پایایی موردانتظار از شبکه

پایایی موردانتظار از شبکه یکی از اولویت‌های بهره‌بردار شبکه است. بهره‌بردار شبکه با توجه به مقدار هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌تواند خواسته‌های متفاوتی از پایایی شبکه داشته باشد، از این رو در این مقاله برای مشخص کردن معاضه‌ای بین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و پایایی شبکه، میانگین تداوم وقفه سیستم (سایدی) به عنوان شاخص پایایی در نظر گرفته شده است.

با تعریف یک ضریب وزنی در تابع هدف مطابق رابطه (۲۴) می‌توان پایایی موردانتظار از شبکه را در تابع هدف مشارکت داد. رابطه (۲۴) یک رابطه یکایی متشکل از دو بخش، بخش اول مجموعه هزینه‌ها و بخش دوم شاخص پایایی شبکه است. هر بخش توسط مقدار پایه مربوطه یکایی شده‌اند. این مقدار پایه زمانی که تابع هدف فقط شامل بخش مورد نظر است، محاسبه می‌شود. در جدول ۴ نتایج حاصل از تغییر ضریب وزنی تابع هدف ارائه شده است. در این تحلیل حداقل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ۱۵۰۰۰۰ دلار در نظر گرفته شده است.

$$\text{Obj.F} = \psi \frac{C^T}{C^{\text{Base}}} + (1 - \psi) \frac{\text{SAIDI}^{\text{total}}}{\text{SAIDI}^{\text{Base}}} \quad (24)$$

نتایج جدول ۴ گویای این موضوع است که رسیدن به کمترین میانگین وقفه مشترکین نیازمند به کارگیری کلیدهایی با سرعت عملکرد بالا است که بتوانند در کمترین زمان ممکن بارهای منقطع را بازایی نمایند. با کاهش ضریب وزنی شاخص پایایی شبکه در تابع هدف، کلیدهای دستی نیز به دلیل هزینه کمتری که دارند در شبکه قرار داده می‌شوند.

جدول ۵: نتایج مقایسه مدل خطی مقاله با مدل غیرخطی مرجع [۶].

مکان کلیدها		مقدار تابع	میانگین وقفه سیستم (h/year cust)	هزینه وقفه شبکه (k\$)	مورد مطالعه
MCS	RCS	هدف (k\$)			
F1: 3U,5D F2: 2D F3: 2U,3U,5D F4: 2U,4D F5: 2U,3U F6: 1U,3D,3U F7: 4D	F1: 4U F2: 2U,3D F3: 4D F4: 3D,5D F5: 3D F6: 2U F7: 2D,4U	۱۱۸۵	۱/۲۳۹۱	۹۲۴	مرجع [۷]
F2: 2D F6: 2D F7: 2D,4U	F1: 4D,5D F2: 3D F3: 3U,4D,5U F4: 3D,4U F5: 2U,3U F6: 3D F7: 5D	۱۰۲۶	۱/۱۴۱۹	۷۹۹	این مقاله

علائم و نشانه‌ها

مجموعه‌ها:

C_j	: مشخص کننده بازه مقدار گیری R_j^T ؛				
N^{Rcs}	: تعداد کل کلید کنترل از راه دور؛			دوره مورد مطالعه (۱۵ سال)؛	n_t
N^{Ms}	: تعداد کل کلید دستی؛			تعداد نقطه بارها؛	n_c
R_i^{Lj}	: وجود کلید کنترل از راه دور در مسیر دیده شدن خطای نام توسط نقطه بار نام؛			تعداد خطاهای شبکه؛	n_f
M_i^{Lj}	: مشخص کننده وجود کلید دستی در مسیر دیده شدن خطای نام توسط نقطه بار نام؛			تعداد خطوط شبکه که کاندید نصب کلیدها هستند؛	n_k
F_i^{Lj}	: متغیر کمکی جهت بیان خطی‌سازی؛				ثابت‌ها:
M_k^D	: وجود یا عدم وجود کلید دستی را در ابتدای خط k نام بیان می‌کند؛			هزینه خرید و نصب کلید کنترل از راه دور؛	C_{Rcs}^{Inv}
M_k^U	: وجود یا عدم وجود کلید دستی را در انتهای خط k نام بیان می‌کند؛			هزینه خرید و نصب کلید دستی؛	C_{Ms}^{Inv}
R_k^D	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور را در ابتدای خط k نام بیان می‌کند؛			هزینه سرویس و تعمیرات کلید کنترل از راه دور؛	C_{Rcs}^M
R_k^U	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور را در انتهای خط k نام بیان می‌کند ($k \in \{1, 2, \dots, n_i\}$)؛			هزینه سرویس و تعمیرات کلید دستی؛	C_{Ms}^M
R_{i-Dk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			نرخ تورم؛	Inf
R_{i-Dk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			نرخ بهره؛	Int
R_{i-Uk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			نرخ ظاهری؛	At
R_{i-Uk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			تداوم وقفه نام؛	R_i
M_{i-Dk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			احتمال عملکردی کلید کنترل از راه دور؛	P^{Rcs}
M_{i-Uk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			احتمال عملکردی کلید دستی؛	P^{Ms}
M_{i-Dk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			مدت زمان عملکرد کلید کنترل از راه دور؛	R^{Rcs}
M_{i-Uk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			مدت زمان عملکرد کلید دستی؛	R^{Ms}
M_{i-Dk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			نرخ خرابی خطای نام؛	λ_i
M_{i-Uk}^{M-U}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			مقداری دلخواه و بسیار بزرگتر از $R_{i,j}$ ؛	\hat{R}_{ij}
M_{i-Dk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^D قرار دارند؛			محدودیت سرمایه‌گذاری اولیه؛	C_B^{Inv}
M_{i-Uk}^{M-D}	: وجود یا عدم وجود کلید کنترل از راه دور در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه نام و مکان M_k^U قرار دارند؛			ماتریس به‌دست‌آمده از پخش بار خطی و مشخص نمودن تأمین یا عدم تأمین نقطه بار نام مادامی که وقفه نام رخ می‌دهد.	β_i^{Lj}

تجهیزات کنترلی در شبکه و اثرات آن بر بهبود پایایی سیستم»، صنعت هوشمند، سال ۱۶، شماره پیاپی ۱۵۰-۱۴۹، صفحه ۳۸-۳۳، آبان و آذر ۱۳۹۲.

[4] م. تورانی، م. ر. آقا ابراهیمی، ح. ر. نجفی، «برنامه‌ریزی محدوده پارکینگ خودروهای الکتریکی و شارژ و دشارژ آن به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان در شبکه‌های هوشمند»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، شماره پیاپی ۸۰، تابستان ۱۳۹۶.

[5] ع. شهبازیان، ع. فریدونیان، س. م. ت. بطحایی، «تقویت ترمیمگر خودترمیم شبکه هوشمند با توسعه تجهیزات کنترلی و حفاظتی شبکه»، سی‌ویکمین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان ۱۳۹۵.

[6] A. Shahsavari, A. Fereidunian, S.M. Mazhari, "A joint automatic and manual switch placement within distribution systems considering operational probabilities of control sequences," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol.25, pp. 2745-2768, 2015.

[7] R. Billinton, S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 1646-1651, 1996.

[8] G. Celli, F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 1167-1172, 1999.

[9] Y. Mao, "Protection System Design for Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation," A Doctor of Philosophy Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University, 2005.

[10] L. Silva, R. Pereira, J. Rivier Abbad, J. Mantovani, "Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm," *Electric Power Systems Research*, Vol.78, pp. 372-381, 2008.

[11] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong, "Multi-objective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," *Electric Power Systems Research*, Vol.79, pp. 1171-1178, 2009.

[12] J.-H. Teng, Y.-H. Liu, "A novel ACS-based optimum switch relocation method," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 113-120, 2003.

[13] D. P. Bernardon, M. Sperandio, V. J. Garcia, L. N. Canha, A. d. R. Abaide and E. F. B. Daza, "AHP Decision-Making Algorithm to Allocate Remotely Controlled Switches in Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1884-1892, July 2011.

[14] P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, A. J. C. da Silva, "A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1031-1036, April 2005.

[15] Chao-Shun Chen, Chia-Hung Lin, Hui-Jen Chuang, Chung-Sheng Li, Ming-Yang Huang, Chia-Wen Huang, "Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1209-1217, Aug. 2006.

[16] H. Falaghi, M.R. Haghifam, Ch. Singh, "Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of

که مابین وقفه Δt و مکان R_k^D قرار دارند را مشخص می‌کند؛

$M_{i-D_k}^{M-D}$: متغیر باینری که وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه Δt و مکان R_k^D قرار دارند را مشخص می‌کند؛

$M_{i-U_k}^{M-U}$: متغیر باینری که وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در انتهای خط‌هایی که مابین وقفه Δt و مکان R_k^U قرار دارند را مشخص می‌کند؛

$M_{i-U_k}^{M-D}$: متغیر باینری که وجود یا عدم وجود کلید کنترل دستی در ابتدای خط‌هایی که مابین وقفه Δt و مکان R_k^U قرار دارند را مشخص می‌کند؛

C^T : مقدار کل تابع هزینه؛

C^{Inv} : هزینه کل خرید و نصب تجهیزات؛

PW_i : ضریب اقتصادی برای بیان ارزش کنونی سرمایه سال t ؛

C^M : هزینه کل تعمیرات و سرویس تجهیزات در طول دوره؛

CIC_{Total}^{Cost} : هزینه کل خاموشی مشترکین در طول دوره مورد مطالعه؛

CIC_j^{Cost} : هزینه خاموشی مشترک Δt در یک سال؛

$f_0^{1.7} (R_j^T)$: هزینه قطعی مشترک Δt که مدت زمان خاموشی مشترک ناشی از کلیه خط‌ها مابین ۰ تا ۱/۷ ساعت است؛

$f_{1.71}^6 (R_j^T)$: هزینه قطعی مشترک Δt که مدت زمان خاموشی مشترک ناشی از کلیه خط‌ها مابین ۱.۷۱ تا ۶ ساعت است؛

U_j^T : مدت زمان خاموشی سالانه مشترک Δt ناشی از کلیه خط‌ها؛

$U_j L_j$: مدت زمان خاموشی سالانه مشترک Δt ناشی از خطای Δt ؛

λ_j^T : نرخ خرابی مشترک Δt ناشی از کلیه خط‌ها؛

$\lambda_i L_j$: نرخ خرابی مشترک Δt ناشی از خطای Δt ؛

R_{ij} : تداوم خاموشی بار Δt ناشی از خطای Δt ؛

R_j^T : تداوم خاموشی بار Δt ناشی از کلیه خط‌ها؛

مراجع

[1] س. عباسپور، ک. زارع، ب. محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۴، شماره پیاپی ۷۰، زمستان ۱۳۹۳.

[2] T. Li and B. Xu, "The self-healing technologies of smart distribution grid," *CICED 2010 Proceedings*, Nanjing, pp. 1-6, 2010.

[3] ع. شهنساری، ع. فریدونیان، ح. لسانی، «اتوماسیون توزیع برای بهبود پایایی سامانه‌های توزیع الکتریکی، قسمت دوم: توسعه

- a multi-objective fuzzy approach," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 6, pp. 493-502, June 2012.
- [25] G. Celli, F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks" *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp.1167-1172, 1999.
- [26] Ying. He, G. Anderson, and R.N. Allan, "Determining optimum location and number of automatic switching devices in distribution systems," *Proceeding of the IEEE power of Tech'99 Conference*, Budapest, Hungary, pp. 182-186, Aug 29- sep 2, 1999.
- [27] J. H. Teng, C. N. Lu, "Feeder - Switch Reallocation for Customer Interruption Cost Minimization," *IEEE Transaction on Power delivery*, vol. 17, pp. 254-259, Aug. 2002.
- [28] A. Fereidunian, M.M Hosseini, and M. Abbasi Talabari. "Toward Self-financed Distribution Automation Development: Time Allocation of Automatic Switches Installation in Electricity Distribution Systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017.
- [29] L. C. Coelho, "Linearization of the product of two variables," jan 2016, <http://www.leandro-coelho.com/linearization-product-variables/2017-01-20/>.
- [30] M. E. Khodayar, M. Barati, M. Shahidehpour, "Integration of high reliability distribution system in microgrid operation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1997-2006, 2012.
- [31] S. D. Manshadi, M. E. Khodayar, "Resilient operation of multiple energy carrier microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 5, pp. 2283-2292, 2015.
- [32] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel and K. S. So, "A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 813-820, May 1991.
- [33] R. A. Brealey, S. C. Meyer, "Principles of Corporate Finance," Sixth Edition. Irwin McGraw-Hill, London, p. 49, 2000.
- Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multi objective Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, 2009.
- [17] Xu, Yin, et al. "Placement of remote-controlled switches to enhance distribution system restoration capability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 2, pp. 1139-1150, 2016.
- [18] H. Dezaki, A. Abyaneh, A. Agheli, K. Mazlumi, "Optimized Switch Allocation to Improve the Restoration Energy in Distribution Systems," *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 47-52, 2012.
- [19] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 271-279, Jan. 2008.
- [20] M. Izadi, M. Farajollahi, A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, "A multistage MILP-based model for integration of remote control switch into distribution networks," *InProbabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), International Conference*, pp. 1-6, Oct 2016.
- [21] A. Abiri-Jahromi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania, M. Mosleh, "Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems," *IEEE Transaction on Power delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 362-370, Jan 2012.
- [22] A. Alam, V. Pant, B. Das, "Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, no. 2, pp. 619-630, Nov 2016.
- [23] J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. P. S. Leão and R. F. Sampaio, "Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 545-552, April 2015.
- [24] I. G. Sardou, M. Banejad, R. Hooshmand, A. Dastfan, "Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in distribution automation system using