

A Systematic Look at the Application of RCM Method to Lines Distance Protection System

Mohammad Hossein Nasri¹, Sayyed Yaser Derakhshandeh², Abbas Kargar³

¹ PhD Candidate of Power Electrical Engineering, Dept. of Technical Science and Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

nasri@stu.sku.ac.ir

² Associate Professor, Dept. of Technical Science and Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

y_derakhshandeh@sku.ac.ir

³ Associate Professor, Dept. of Technical Science and Engineering, University of Shahrekord, Shahrkord, Iran

kargar@ieee.org

Abstract:

Distance protection system as the main lines' protection, has an essential role in networks' reliability. Thus an optimized maintenance plan for distance protection can influence on network reliability and costs. Intrinsic hidden function of the protection systems cause some problem in the way of applying reliability-centered maintenance technique (RCM) as an effective planning method. In this study, the concept of systematic solution view in RCM is proposed instead of equipment-based solution view. The presented concept can well model the behavior of a hidden performance system. Also, Markov process and krill optimization algorithm is used for calculating the reliability and finding optimal time intervals between maintenance tasks. Increasing system reliability and decreasing costs are considered as optimization aims. The proposed method has been implemented and tested using real data of two distance protection systems. The output results show that the proposed method is capable of providing higher reliability and lower cost than other methods.

Keywords: Krill Optimization Algorithm, Distance Protection, Markov Process, Reliability Centered Maintenance Technique (RCM).

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

محمدحسین نصری^۱، سید یاسر درخشنده^۲، عباس کارگر^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

nasri@stu.sku.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

y_derakhshandeh@sku.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

kargar@ieee.org

چکیده: سیستم حفاظت دیستانس به عنوان حفاظت اصلی خطوط، نقش اساسی در قابلیت اطمینان شبکه دارد؛ بنابراین، یک برنامه نگهداری و تعمیرات بهینه برای حفاظت دیستانس، تأثیر بسزایی بر قابلیت اطمینان و هزینه‌های شبکه دارد. ماهیت عملکرد نهان در سیستم‌های حفاظتی مشکلاتی را در راستای اعمال روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های برنامه‌ریزی ایجاد می‌کند. در این مقاله مفهوم نگاه سیستمی در مسئله RCM به جای نگاه تجهیز محور برای حل این مشکل ارائه شده است. مفهوم ارائه شده به خوبی رفتار یک سیستم دارای ماهیت عملکرد نهان را مدل می‌کند. در این مقاله از فرایند مارکوف و الگوریتم بهینه‌سازی میگو برای محاسبات قابلیت اطمینان و یافتن فواصل زمانی بهینه بین وظایف نگهداری و تعمیرات استفاده شده است. افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه، اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. روش پیشنهادی با بهره‌گیری از داده‌های حقیقی دو سیستم حفاظتی دیستانس پیاده‌سازی و تست شده است. نتایج خروجی، توانایی روش پیشنهادی در تأمین قابلیت اطمینان بالاتر و تحمیل هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌ها را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی میگو، حفاظت دیستانس، فرایند مارکوف، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان.

۱- مقدمه

فراوانی در راستای افزایش قابلیت اطمینان انجام می‌دهند. یکی از موارد تأثیرگذار در این راستا برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات است که تأثیر بسیار زیادی بر قابلیت اطمینان می‌گذارد. همچنین، تعمیرات و نگهداری هزینه‌های بسیاری را به سیستم تحمیل می‌کند که به دست آوردن نقطه بهینه همواره یکی از اهداف بهره‌برداران بوده است؛ به گونه‌ای که با صرف کمترین هزینه، قابلیت اطمینان مدنظر سیستم به دست آید.

به منظور بهبود روش‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، همواره روش‌های جدیدی در این راستا معرفی می‌شوند. در ابتدا، روش نگهداری و تعمیرات زمان محور (TBM)^۱ مطرح شد که در آن، زمان‌بندی‌های نگهداری و

با توجه به اهمیت روزافزون انرژی الکتریکی در زندگی امروزه و وابستگی بالای مصرف‌کنندگان به آن، انتظار دسترسی به انرژی با قابلیت اطمینان بالا در حال افزایش است؛ در نتیجه، بهره‌برداران شبکه برق تلاش و هزینه

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۵

نام نویسنده مسئول: سید یاسر درخشنده

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

پژوهشگران در [۱۰]، یک روش بهینه به منظور تعیین میزان اهمیت واحدهای تولید برای اعمال RCM پیشنهاد کرده‌اند که از تئوری بازی برای بررسی سهم هر واحد تولید در قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌کند. در [۱۴] نیز روشی برای اعمال RCM بر مدارشکن‌ها پیشنهاد شده است که اهمیت و شرایط تکنیکی آنها را در نظر می‌گیرد. این روش بر یک شبکه انتقال ۴۰۰ کیلوولت پیاده‌سازی شده است.

یک روش بهینه نگهداری و تعمیرات براساس روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از به‌کارگیری روش RCM مبتنی بر آنالیزهای فرمولی و غیرفرمولی در [۱۸] ارائه شده است. سپس با تحلیل نتایج کاربردهای عملی و شبیه‌سازی‌های مختلف دیده شده که با روش پیشنهادی، قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری سیستم بهبود و هزینه کلی بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات کاهش یافته است. به‌منظور تعیین تجهیزات با اهمیت بالا، روشی روی ترکیب واحدهای تولید توان و شبکه‌های انتقال در [۱۱] پیشنهاد شده که اهمیت تجهیزات با توجه به تأثیر آنها در خاموشی و هزینه‌های مرتبط با آن محاسبه شده است.

برای زمان‌بندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مدارشکن‌ها و رله‌های حفاظت در سیستم، روشی برای سنجش اهمیت آنها در [۱۹] ارائه شده است. با توجه به اینکه در این مرجع، دو تجهیز به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند، تأثیر آنها بر یکدیگر و تأثیر دیگر تجهیزات موجود در سیستم حفاظت بر قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته نشده است.

در [۲۰]، برای دسته‌بندی حالات عملکردی قابل رخداد مربوط به یک خط انتقال محافظت‌شده با یک رله در یک محیط آلوده به هارمونیک، یک مدل قابلیت اطمینان مارکوف به کار گرفته شده است. سپس تأثیر برنامه نگهداری و تعمیرات بر قابلیت اطمینان بررسی شده و نتیجه گرفته شده است که بسیاری از ضرایب مارکوف به حفاظت سیستم وابسته است؛ اما در این پژوهش فقط اثر رله دیده شده است.

در مرجع [۲۴]، متد RCM بر سیستم حفاظت موجود در یک شبکه هوشمند پیاده‌سازی شده است. در این مرجع،

تعمیرات بدون در نظر گرفتن اهمیت یا شرایط تجهیز صورت می‌گیرد [۱]. در ادامه، روش نگهداری و تعمیرات شرایط محور (CBM) مطرح شد که برنامه‌ریزی در آن براساس شرایط تجهیز و اهمیت آن صورت می‌گیرد [۲]. این دو دسته روش روی بیشتر تجهیزات شبکه برق اعمال شده‌اند [۱-۴].

پس از این دو روش، روش برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) پیشنهاد شد. این روش با توجه به سوابق تجهیزات، اهمیت و شرایط آنها و ارتباط آنها با یکدیگر، برنامه‌ای را ارائه می‌دهد که سعی دارد قابلیت اطمینان سیستم را حداکثر و هزینه عمر تجهیزات را حداقل کند [۵]. این روش با ارائه نتایج پذیرفتنی روی تجهیزات بسیاری در سیستم‌های انتقال مانند ترانسفورماتورها، خطوط انتقال، مدارشکن‌ها و ... پیاده‌سازی شده است [۶-۱۸]؛ اما به‌صورت بسیار محدود برای سیستم‌های حفاظتی استفاده شده که علت این امر خاصیت عملکرد نهان این سیستم‌ها است. همچنین، در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه حفاظت، فقط به رله‌ها توجه شده است [۱۹-۲۲].

سیستم با ماهیت عملکرد نهان به سیستمی گفته می‌شود که اگر خرابی در برخی تجهیزات سیستم موجود باشد، مشکل در لحظه رخداد خرابی مشخص نمی‌شود و تا زمانی نهان می‌ماند که خطایی در سیستم رخ ندهد یا تجهیز تست نشود [۲۳].

یک مدل چندهدفه برای حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات در یک سیستم توزیع توان الکتریکی در مرجع [۹] پیشنهاد شده که اهداف اصلی آن، پیشینه‌سازی شاخص قابلیت اطمینان کلی سیستم و کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه است. در این روش، شاخص‌های میانگین مدت وقفه سیستم و شاخص میانگین وقفه فرکانسی سیستم (SAIDI و SAIFI) در نظر گرفته شده‌اند و از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک NSGA-II برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. روش پیشنهادی، توانایی در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف را دارد که تأثیر در قابلیت اطمینان اجزا و بهبود شاخص‌های کلی قابلیت اطمینان را موجب می‌شود.

مدهای خرابی آنها بررسی می‌شوند؛ در نتیجه، خروجی این روش شامل یک یا مجموعه‌ای از وظایف نگهداری و تعمیرات برای هر تجهیز خواهد بود.

در روش پیشنهادی در این مقاله، پس از تعیین وظایف نگهداری و تعمیرات هر تجهیز موجود در سیستم حفاظت دیستانس، از مدل مارکوف و الگوریتم بهینه‌سازی میگو برای یافتن فواصل بهینه میان زمان انجام‌دادن وظایف نگهداری و تعمیرات آنها استفاده شده است. دو هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم حفاظت دیستانس و کمینه‌سازی هزینه، اهداف این بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین، نوآوری‌های موجود در این مقاله به صورت زیر بیان می‌شود:

۱- بیان مفهوم جدید نگاه سیستمی در اعمال RCM بر سیستم‌های با عملکرد نهان؛ ۲- استفاده از مفهوم نگاه سیستمی در اعمال RCM بر یک سیستم حفاظت دیستانس؛ ۳- ایجاد مدل مارکوف برای یک سیستم حفاظتی کامل به منظور محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم؛ ۴- استفاده از الگوریتم چندهدفه میگو برای تعیین ضرایب بهینه مدل مارکوف.

در ادامه این مقاله ابتدا در قسمت ۲، ابزارهای استفاده‌شده برای تعیین وظایف نگهداری، تعمیرات تجهیزات و مدل‌سازی آن و نیز ابزار بهینه‌سازی به کار گرفته شده معرفی و به اختصار شرح داده شده است. سپس در قسمت ۳ روش پیشنهادی و پیاده‌سازی آن بر سیستم حفاظت دیستانس شرح داده شده است. در قسمت ۴ روش پیشنهادی ارائه‌شده روی دو پست فوق توزیع با استفاده از داده‌های واقعی اعمال شده و نتایج عددی عملکرد روش پیشنهادی بررسی شده است. در نهایت، در قسمت ۵ نتیجه‌گیری کلی مقاله ارائه شده است.

۲- ابزارشناسی

سه ابزار استفاده‌شده در این مقاله، RCM، مدل مارکوف و الگوریتم بهینه‌سازی‌اند که در ادامه به اختصار شرح داده شده‌اند.

توانایی متد پیشنهادی در اعمال تأثیر مواردی همچون تفاوت‌های آب‌وهوایی و اهمیت سیستم در شبکه بر برنامه نگهداری و تعمیرات بررسی نشده است. همچنین، در مدل‌سازی رفتار سیستم با فرایند مارکوف، رفتارهایی همچون تأثیر خرابی یک تجهیز بر دیگر تجهیزات، روند تست تجهیزات در هنگام رخداد خطا در سیستم و تفاوت عملکرد و ماهیت بخش‌های AC و DC در نظر گرفته نشده‌اند.

دو ایراد اساسی در اعمال RCM بر رله‌ها به تنهایی و مستقل از کل سیستم حفاظتی وجود دارد. نخست، با توجه به سوابق خطاهای سیستم‌های حفاظتی، رله‌ها و به‌ویژه رله‌های دیجیتال، درصد بسیار پایینی از خرابی را نسبت به دیگر تجهیزات موجود در سیستم حفاظتی مانند وایرینگ، ترمینال‌ها و کویل تریپ به خود اختصاص داده‌اند [۲۳]. دوم، با توجه به ماهیت عملکرد نهان تجهیزات سیستم‌های حفاظتی به عنوان مشکل اساسی در سد راه اعمال RCM روی این سیستم‌ها، نمی‌توان به هنگام محاسبه قابلیت اطمینان مسیر مستقیمی بین حالت کار عادی تجهیز و خرابی آن در نظر گرفت؛ زیرا همان‌گونه که گفته شد، مشکل در لحظه رخداد خرابی مشخص نمی‌شود و تا زمانی نهان می‌ماند که خطایی در سیستم رخ ندهد یا تجهیز تست نشود [۲۳]. به منظور رفع این ایرادها و موانع، روشی در این مقاله ارائه شده است تا بتوان از مزایای این روش استفاده کرد. در این روش، به جای نگاه به یک تجهیز در هنگام اعمال RCM، کل سیستم حفاظتی به صورت یکجا بررسی می‌شود. این نگاه سیستمی به مسئله RCM علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر کلیه تجهیزات سیستم حفاظتی بر قابلیت اطمینان سیستم، موجب می‌شود بتوان تمامی مسیرهای موجود به حالت خرابی سیستم را مدنظر گرفت. این مسیرها شامل «مسیر تست تجهیز به خرابی آن» و «مسیر خطای کلی سیستم حفاظتی به خرابی تجهیز» هستند.

نگاه تجهیززی در RCM، بخش‌های مختلف یک تجهیز را مشخص و مدهای خرابی آنها را بررسی می‌کند و در نهایت، برای هر بخش یک یا مجموعه‌ای از وظایف نگهداری و تعمیرات را ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که در نگاه سیستمی، تجهیزات مختلف یک سیستم مشخص شده‌اند و

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

رخداد بین تمامی حالات برای این سیستم باید مشخص شود. مقادیر این ضرایب با استفاده از داده‌های پیشین و روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\lambda = \left(\frac{\text{تعداد خط مشاهده شده در یک زمان معین}}{\text{مجموع زمان عملیاتی سیستم}} \right) \quad (۱)$$

$$\mu = \left(\frac{\text{تعداد تعمیرات با بازسازی دقیق در یک زمان معین}}{\text{مجموع زمان تعمیر سیستم}} \right) \quad (۲)$$

در روابط بالا، λ و μ به ترتیب نشان‌دهنده آهنگ وقوع خطا و آهنگ تعمیرند.

در این مرحله، ماتریس تغییر حالت (P) با استفاده از ضرایب مدل مارکوف تشکیل داده می‌شود. در این ماتریس درایه سطر mام و ستون nام برابر با ضریب مسیر گذر از حالت m به حالت n است. اگر هیچ مسیری از حالت m به حالت n موجود نباشد، درایه مرتبط با آن برابر صفر خواهد بود. همچنین، درایه‌های قطر اصلی به گونه‌ای اند که مجموع درایه‌های هر سطر برابر ۱ می‌شود. دیده می‌شود که با فرض وجود k حالت در مدل مارکوف، ماتریس P به صورت $k \times k$ خواهد بود. سپس با حذف سطر و ستون‌های مرتبط به حالات عملکردناشتن سیستم، ماتریس Q سیستم تشکیل می‌شود. در گام بعد، ماتریس M با استفاده از رابطه زیر ایجاد می‌شود:

$$M = [1 - Q]^{-1} \quad (۳)$$

با فرض وجود k حالت در مدل مارکوف و وجود l حالت معرف عملکردناشتن سیستم، ماتریس M یک ماتریس $(k-1) \times (k-1)$ خواهد بود و شاخص MTTF با فرض شروع از حالت i با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$MTTF \Big|_{\text{initialstate}=1} = \sum_{j=1}^{k-1} m_{ij} \quad (۴)$$

m_{ij} نشان‌دهنده عنصر سطر iام و ستون jام ماتریس M است.

۲-۱- نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)

در ابتدا باید کلیه تجهیزات موجود در سیستم مطالعه شده، شکست‌های عملکردی آنها و تأثیرات این شکست‌ها، تحلیل و بررسی و برای هر تجهیز موجود، نوع وظیفه نگهداری و تعمیرات مناسب تعیین شود. این تصمیم‌گیری با استفاده از فلوجارت تصمیم‌گیری RCM [۵] صورت می‌گیرد. گفتنی است افراد خبره و آگاه به سیستم مطالعه شده باید این فرایند تصمیم‌گیری را اتخاذ کنند و انجام آن فقط با استفاده از کامپیوتر و داده‌های ثبت شده صحیح نیست [۵].

با توجه به فلوجارت تصمیم‌گیری RCM [۵]، وظایف مختلف نگهداری و تعمیرات قابل انتخاب برای هر تجهیز به شرح زیر است:

- فعالیت اقتضایی زمان‌بندی شده
- فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده
- فعالیت از رده خارج کردن زمان‌بندی شده
- فعالیت جستجوی شکست زمان‌بندی شده
- ترکیبی از فعالیت‌ها
- بازطراحی
- نیازنداشتن به فعالیت زمان‌بندی شده

۲-۲- مدل مارکوف

فرایند مارکوف، ابزاری کارآمد برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های غیرخطی و پیچیده است که براساس حالات کاری ممکن و مسیرهای گذر بین این حالات عمل می‌کند و تاکنون با ارائه نتایج پذیرفتنی در پژوهش‌های مختلفی استفاده شده است [۲۵-۲۷]. با توجه به سیستم حفاظت دیستانس که ماهیتی پیوسته در زمان دارد، فرایند پیوسته مارکوف در این پژوهش استفاده می‌شود. به‌منظور سنجش قابلیت اطمینان نیز از شاخص میانگین زمان تا خرابی (eMTTF) استفاده می‌شود که مقدار بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالاتر است.

نخستین گام در راستای تشکیل مدل مارکوف برای یک سیستم شناخت کلیه حالات عملکردی است که امکان ورود سیستم به آنها موجود است. پس از آن، کلیه مسیرهای قابل

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی

در این مقاله الگوریتم میگو برای بهینه‌سازی مدل ریاضی ارائه شده است [۲۸-۲۹] که جزء الگوریتم‌های هوش ازدحامی دسته‌بندی می‌شود و مبتنی بر شبیه‌سازی حرکات و رفتار دسته‌ای میگوها برای یافتن غذا است. با استفاده از این الگوریتم، مسائلی حل می‌شوند که حل دقیق در زمان منطقی ندارند و جوابی موجه و نزدیک به بهینه برای آنها می‌توان یافت. در الگوریتم میگو کمترین فاصله بین هر میگو تا غذا و فاصله تا جمعیت متمرکز دسته میگوها، تابع هدف برای حرکت میگوها در نظر گرفته می‌شود. حرکت هر میگو در این الگوریتم با سه فاکتور فرمول‌بندی می‌شود:

۱- حرکت القایی توسط دیگر میگوها

۲- کاوش برای پیدا کردن غذا

۳- حرکت تصادفی

دو محرک ابتدایی، هر دو شامل بهینه‌ساز جهانی و محلی‌اند. این دو استراتژی جهانی و دو استراتژی محلی به‌صورت موازی کار می‌کنند که نتیجه آن، بهره‌وری درخور توجه الگوریتم است. برای جستجوی تصادفی نیز محرک سوم استفاده شده است.

در هر الگوریتم بهینه‌سازی، یکی از مهم‌ترین بخش‌ها تنظیم پارامترها است. یکی از ویژگی‌های جالب الگوریتم پیشنهادی این است که رفتار کریل را به دقت شبیه‌سازی می‌کند و برای به دست آوردن ضرایب، از روش‌های تجربی دنیای واقعی استفاده می‌کند. به دلیل این واقعیت، فقط باید فاصله زمانی در الگوریتم تنظیم شود.

سایر ویژگی‌ها و مزایای روش پیشنهادی به شرح زیرند:

- هر عامل با توجه به تابع هدف خود در فرایند حرکت سهیم است.
- هریک از همسایگان، تأثیر جاذبه - دافعه بر حرکت هر میگو دارد؛ بنابراین، این تأثیرات می‌توانند به‌عنوان جستجوی محلی برای هر میگو عمل کنند.
- مرکز غذای تعیین شده با تابع هدف تمامی میگوها، تخمینی برای بهترین جواب کلی در نظر گرفته می‌شود.

این متد تاکنون در مسائل مختلفی همچون بهینه‌سازی سیستم کنترلی توربین‌های بادی، پخش بار اقتصادی،

بهینه‌سازی استراتژی قیمت‌دهی در بازار برق و ... استفاده شده است [۲۹-۳۱].

به‌منظور تقلید رفتار میگوها، دسته‌ای از میگوها تولید و موقعیت آنها براساس رابطه‌های (۵) و (۶) به‌روزرسانی می‌شوند:

$$x_i^{g+1} = x_i^g + v_i^g * k \left(\sum_{j=1}^{N_d} UP_j - LOW_j \right) \quad (5)$$

$$v_i^g = v_{I,i}^g + v_{F,i}^g + v_{D,i}^g \quad (6)$$

به ترتیب بیان‌کننده موقعیت هر

میگو، حد بالا و پایین هر متغیر کنترلی‌اند. همچنین، $v_{I,i}^g$

به ترتیب نشان‌دهنده سرعت‌های ناشی از

حرکت القایی، کاوش برای پیدا کردن غذا و حرکت تصادفی‌اند که بیان ریاضی آنها در زیر آمده است.

• سرعت مبتنی بر حرکت القایی

در این بخش، تأثیر میگوهای همسایه بر هر فرد مدل‌سازی می‌شود. سرعت هر میگو مبتنی بر تأثیر محلی، تأثیر هدف و تأثیر دافعه تنظیم می‌شود که به‌صورت روابط (۷) و (۸) فرمول‌بندی می‌شود:

$$v_{I,i}^g = \sigma_{I,i} v_{I,i}^{\max} + \partial_{I,i}^{g-1} \quad (7)$$

$$\sigma_{I,i} = \sum_{j=1}^{N_n} \left[\frac{A_i - A_j}{A_w - A_b} \times \frac{x_i - x_j}{\|x_i - x_j\| + s} \right] \quad (8)$$

$$+ 2 \left[\text{rand} + \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \right] A_i^b x_i^b$$

تأثیر محلی و تأثیر هدف با $\sigma_{I,i}$ در سرعت القایی

مدل‌سازی شده‌اند. σ_I وزن اینرسی سرعت القایی و بین

[۰،۱] است. A_i ، A_w و A_b به ترتیب تابع برازندگی نامین میگو، بدترین و بهترین میگو دیده‌شده در جمعیت‌اند.

iter_{\max} و iter تکرار فعلی و حداکثر تکرار را نشان

می‌دهند. انتخاب همسایه برای هر میگو براساس قلمرو شناخت و موقعیت هر میگو در فضای جستجو تعیین می‌شود. هر میگو نزدیک‌ترین افراد واقع در قلمرو شناخت

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

گام ۲: تعیین نوع وظیفه نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر تجهیز موجود در سیستم حفاظت دیستانس با استفاده از فلوجارت تصمیم‌گیری RCM و نظرات افراد خبره و آگاه به سیستم حفاظت دیستانس.

گام ۳: تشکیل مدل مارکوف برای کل سیستم حفاظت دیستانس برای محاسبه قابلیت اطمینان با توجه به گام‌های پیشین.

گام ۴: استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به منظور یافتن برنامه نگهداری و تعمیرات با قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم با تعیین ضرایب بهینه مدل مارکوف.

برای شناخت تمامی تجهیزات موجود در سیستم حفاظت دیستانس، مدار مذکور در شکل (۱) آمده است. این مدار به یک سیستم حفاظت دیستانس خط فوق توزیع مربوط است که در یک پست ۶۳/۲۰ کیلوولت استفاده شده است. کمپانی ABB، طراحی و پیاده‌سازی این پست را انجام داده است.

با بررسی سوابق خرابی تجهیزات و با استفاده از دانش افراد خبره، مدهای خرابی هر تجهیز و اثرات این خرابی‌ها بر سیستم شناسایی و استخراج شدند. این مدها و اثرات خرابی و همچنین، نوع وظیفه نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر مد خرابی در جدول (۱) آمده است. نوع وظیفه نگهداری و تعمیرات لازم با استفاده از نمودار تصمیم‌گیری RCM به دست آمده است.

در مرحله بعد، با توجه به تصمیمات گرفته شده درباره نوع وظایف نگهداری و تعمیرات و با استفاده از دانش افراد خبره، کلیه حالات ممکن سیستم و مسیرهای آن شناسایی شدند و بر مبنای آن، مدل مارکوف سیستم حفاظت دیستانس تهیه شد؛ این مدل برای سیستم حفاظت دیستانس در شکل (۲) نشان داده شده است.

دیده می‌شود مدل مارکوف به دست آمده برای سیستم حفاظت دیستانس، ۳۱ حالت کاری دارد. حالت ۱ و ۲ به ترتیب حالت عملکرد عادی سیستم و حالت خطای سیستم‌اند. با توجه به اینکه حالت ۲ فقط حالت عملکردناشتن سیستم است و با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۲-۲، هنگام تبدیل ماتریس P به ماتریس Q، سطر و ستون دوم آن باید حذف شود.

را به عنوان همسایه انتخاب می‌کند. فاصله بین میگوها (d_z) با رابطه (۹) معین می‌شود:

$$d_z = \frac{1}{5N_c} \sum_{j=1}^{N_c} \|x_i - x_j\| \quad (9)$$

• سرعت مبتنی بر جستجوی غذا

ایده به‌روزرسانی سرعت مبتنی بر جستجوی غذا براساس حافظه میگوها در پیدا کردن غذا است که در آن هر میگو سرعت خود را مطابق غذای فعلی و قبلی به صورت آورده شده در رابطه (۱۰) به‌روزرسانی می‌کند.

$$v_{F,i}^g = 0.02 \left[2 \left(1 - \frac{iter}{iter_{max}} \right) A_i \frac{\sum_{j=1}^{N_n} \frac{x_j}{A_j}}{\sum_{j=1}^{N_n} \frac{1}{A_j}} \right] + \partial_{Fv} v_{F,i}^{g-1} \quad (10)$$

• سرعت مبتنی بر حرکت تصادفی

تنوع جمعیت در طول فرایند بهینه‌سازی با حرکت به صورت تصادفی تضمین می‌شود. مدل‌سازی این قسمت به صورت رابطه (۱۱) است.

$$v_{D,i}^g = \mathcal{G} * v_D^{\max} \quad (11)$$

حداکثر سرعت پراکنندگی است که در محدوده v_D^{\max} قرار دارد. [۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱] بیان‌کننده بردار جهت تصادفی است که در بازه [-۱، ۱] است.

به منظور دستیابی به بهینه سراسری و افزایش سرعت همگرایی، از اپراتورهای الگوریتم ژنتیک (تلفیق و جهش) در الگوریتم میگو استفاده شده است.

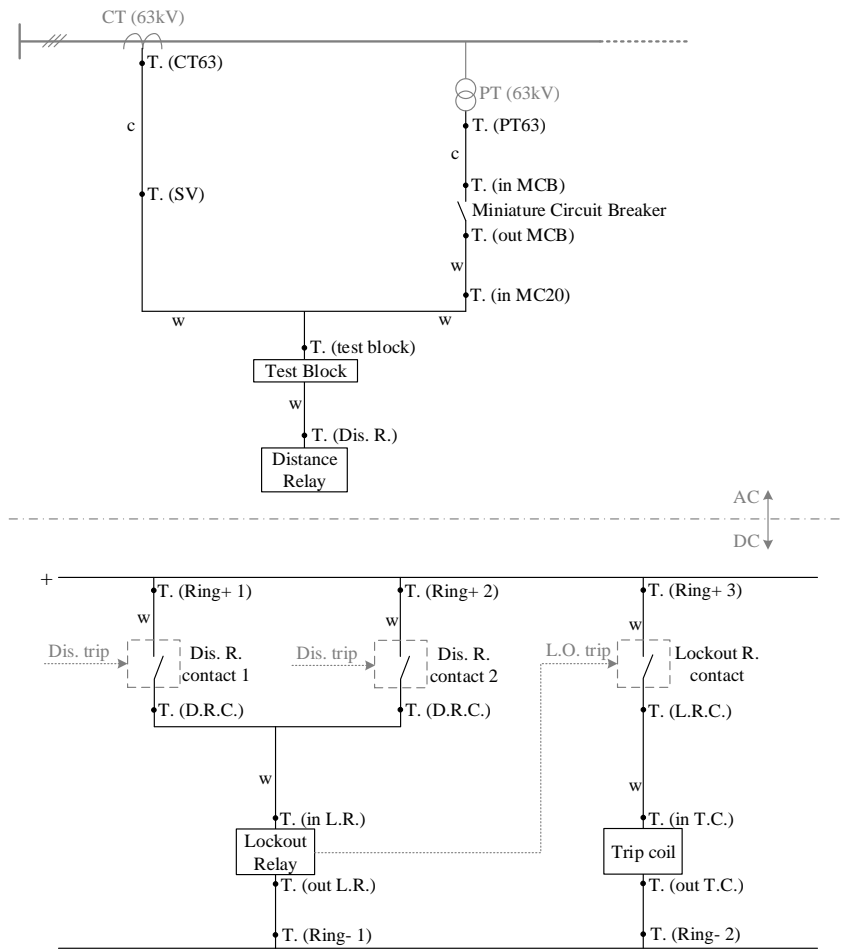
۳- روش پیشنهادی و پیاده‌سازی آن

در این مقاله برای استفاده از مفهوم نگاه سیستمی در اعمال RCM بر سیستم حفاظت دیستانس استفاده شده روی خطوط فوق توزیع موجود در شبکه‌های انتقال و دستیابی به برنامه بهینه نگهداری و تعمیرات برای سیستم مذکور دارای عملکرد نهان، روند کلی زیر انجام شده است:

گام ۱: شناخت و تحلیل تجهیزات موجود در سیستم حفاظت دیستانس و مدهای خرابی هر تجهیز.

سیستم، شروع و پس از «تست یا نت تجهیز» به «خرابی تجهیز» منتهی می‌شود یا از «حالت کار عادی» سیستم شروع می‌شود و پس از «خطای سیستم» به «تست تجهیز» و سپس به «خرابی تجهیز» می‌رسد.

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، هیچ مسیری بین حالت کار عادی سیستم (حالت N) به حالات خرابی (تعمیر یا تعویض) تجهیزات موجود نیست که بیان‌کننده مفهوم سیستم با «عملکرد نهان» است؛ در نتیجه، مسیرهای منتهی به خرابی تجهیزات از «حالت کار عادی»



شکل (۱): مدار سیستم حفاظت دیستانس خطوط فوق توزیع در شبکه انتقال

در مسئله برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات می‌توان در نظر گرفت. این ۱۰ پارامتر و تعریف آنها به صورت زیرند:

ρ_{m-at} : نرخ انتقال به فعالیت بازسازی ترمینال‌های (AC) X_1

ρ_{m-mc} : نرخ انتقال به فعالیت بازسازی مدارشکن‌های مینیاتوری X_2

ρ_{m-tb} : نرخ انتقال به فعالیت اقتضائی تست بلاک X_3

تجهیزات از «حالت کار عادی» سیستم، شروع و پس از «تست یا نت تجهیز» به «خرابی تجهیز» منتهی می‌شود یا از «حالت کار عادی» سیستم شروع می‌شود و پس از «خطای سیستم» به «تست تجهیز» و سپس به «خرابی تجهیز» می‌رسد. از بین تمامی ضرایب انتقال موجود در مدل مارکوف ارائه شده برای سیستم حفاظت دیستانس، فقط مقادیر ۱۰ پارامتر به صورت مستقل‌اند و آنها را پارامترهای بهینه‌سازی

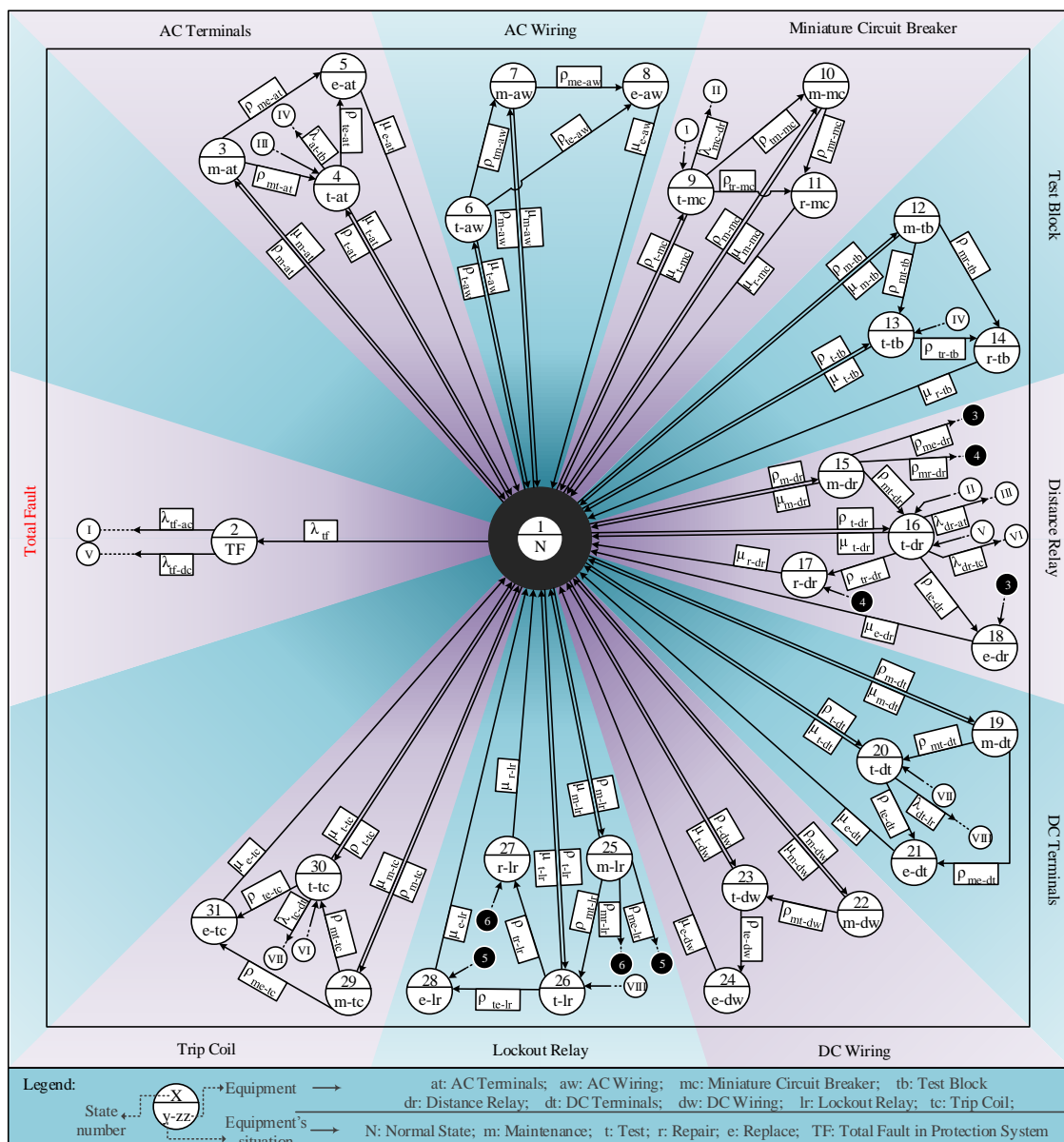
نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

ρ_{m-dr} : X4 (نرخ انتقال به فعالیت اقتضائی رله دیستانس)	ρ_{m-ic} : X8 (نرخ انتقال به فعالیت بازسازی کویل تریپ)
ρ_{t-dr} : X5 (نرخ انتقال به فعالیت جستجوی شکست رله دیستانس)	ρ_{m-aw} : X9 (نرخ انتقال به فعالیت نگهداری و تعمیرات وایرینگ‌های AC)
ρ_{m-dt} : X6 (نرخ انتقال به فعالیت بازسازی ترمینال‌های DC)	ρ_{m-dw} : X10 (نرخ انتقال به فعالیت نگهداری و تعمیرات وایرینگ‌های DC)
ρ_{t-lr} : X7 (نرخ انتقال به فعالیت جستجوی شکست رله lockout)	

جدول (۱): مدها و تأثیرات خرابی تجهیزات سیستم حفاظت دیستانس

وظیفه نگهداری و تعمیرات (نت)	نتیجه خرابی			اثرات خرابی	مدهای خرابی (FM)	تجهیزات سیستم حفاظتی (Eq)
	عملکرد غیرایمن	عملکرد کاذب	عملکرد نداشتن			
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده	*	*	*	عملکرد کاذب انفجار CT	[ا] اشکال در اتصال به ترمینال	ثانویه
نیاز نداشتن به نت زمان‌بندی شده	*		*	انفجار CT	[ب] اشکال در ترمینال ثانویه	CT
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده	*	*	*	عملکرد کاذب	[ت] اشکال در اتصال به ترمینال	ثانویه PT
نیاز نداشتن به نت زمان‌بندی شده	*	*	*	معیوب شدن تست بلاک معیوب شدن رله انفجار CT	[ث] اشکال در وایر شو	تست ترمینال بلاک و رله AC
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده	*	*	*	سوختن ترمینال انفجار CT	[ج] شل شدن وایر در ترمینال	
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده	*	*	*	سوختن ترمینال انفجار CT	[ح] اشکال در لینک وسط ترمینال	دیگر ترمینال‌ها
عدم نیاز به نت زمان‌بندی شده	*	*	*	عملکرد نداشتن رله در فالت	[خ] اتصال کوتاه ترمینال	
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	عملکرد نداشتن رله در فالت	[ا] شل شدن وایر در ترمینال	رینگ + و -
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	عملکرد نداشتن رله در فالت	[ب] اشکال در ترمینال	
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[ت] شل شدن وایر در ترمینال	ترمینال DC
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[ث] اشکال در لینک وسط ترمینال	کنتاکت‌ها
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[ج] اشکال در وایر شو	

وظیفه نگهداری و تعمیرات (نت)	نتیجه خرابی			اثرات خرابی	مدهای خرابی (FM)	تجهیزات سیستم حفاظتی (Eq)	
	عملکرد غیرایمن	عملکرد کاذب	عملکرد نداشتن				
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[ح] قطعی وایر در اتصال سوکت	کوئل تریپ‌ها	
فعالیت بازسازی زمان‌بندی شده			*	عملکردنداشتن رله در فالت	[أ] از دست دادن حساسیت	Miniature Circuit Breaker	۳
فعالیت اقتضایی زمان‌بندی شده	*	*	*	معیوب‌شدن تست بلاک انفجار CT	[أ] اشکال در اتصالات تست بلاک	تست بلاک	۴
فعالیت جستجوی شکست زمان‌بندی شده			*	عملکردنداشتن رله در فالت	[أ] اشکال در کارت		
فعالیت اقتضایی زمان‌بندی شده			*	عملکردنداشتن رله در فالت	[ب] اشکال در تغذیه رله (کانورتر)	رله دیستانس	۵
فعالیت جستجوی شکست زمان‌بندی شده			*	عملکردنداشتن رله در فالت	[ت] اشکال در خروجی		
نیازنداشتن به نت زمان‌بندی شده	*	*	*	عملکردنداشتن رله عملکرد کاذب رله انفجار CT	[أ] اشکال در عایق کابل و قطعی وایر	کابل‌ها و وایرهای AC	۶
نیازنداشتن به نت زمان‌بندی شده		*	*	بازشدن کاذب کلید	[أ] اشکال در عایق وایر	وایرهای DC	۷
نیازنداشتن به نت زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[ب] قطعی وایر		
فعالیت جستجوی شکست زمان‌بندی شده			*	عملکردنداشتن رله در فالت	[أ] اشکال در خروجی	رله Lockout	۸
فعالیت جستجوی شکست زمان‌بندی شده			*	بازنشدن کلید در فالت	[أ] سوختن کوئل تریپ	کوئل تریپ	۹



شکل (۲): مدل مارکوف سیستم حفاظت دیستانس

برای یافتن تجهیز خراب در هنگام رخداد خرابی به این صورت است:

مدار شکن های مینیاتوری (mc) ← رله دیستانس (dr)
 ← ترمینال های AC (at) ← تست بلاک (tb)
 برای مثال، با تغییر برنامه نگهداری و تعمیرات مربوط به تست بلاک و با توجه به تأثیر این تغییر بر خرابی تست بلاک، پارامتر λ_{at-tb} (نرخ انتقال از تست at به تست tb) به صورت رابطه زیر تغییر می کند:

دیگر ضرایب انتقال موجود در مدل مارکوف به این پارامترها وابسته است و مقادیر آنها با توجه به مقادیر این ۱۰ پارامتر، دانش افراد خیره و سوابق سیستم محاسبه می شوند. با توجه به اینکه «منحنی عمر یکنواخت»، منحنی عمر تجهیزات حفاظتی شناخته می شود، دیگر ضرایب به صورت خطی نسبت به ضرایب بهینه سازی تغییر می کنند.

در ادامه، نمونه ای از نحوه تغییر دیگر پارامترها با توجه به پارامترهای بهینه سازی ارائه شده است. همان گونه که در شکل (۲) دیده می شود، روند بررسی تجهیزات بخش AC

با استفاده از نظر افراد خبره، حداقل و حداکثر زمان برای انجام وظایف نگهداری و تعمیرات یک سال و پنج سال است؛ بر این مبنا و با توجه به اینکه واحد پارامترهای بهینه‌سازی ۱ بر سال است، قید (۱۹) در ساختار مسئله بهینه‌سازی به منظور کنترل حداقل و حداکثر زمان انجام وظایف نت اعمال می‌شود:

$$\frac{1}{5} < x_i < \frac{1}{1} \quad (19)$$

همان‌گونه که گفته شد، بیشینه‌کردن قابلیت اطمینان و کمینه‌کردن هزینه، دو هدف انتخابی در راستای بهینه‌سازی برنامه تعمیرات و نگهداری سیستم حفاظت دیستانس در این مقاله‌اند. پس با ضرب شاخص قابلیت اطمینان در (۱-)، مسئله بهینه‌سازی موجود در اینجا یک مسئله دو هدفه مینیمم‌سازی خواهد بود که اهداف آن به صورت روابط (۲۰) و (۲۱) بیان می‌شوند:

$$F_1(P) = \min(-MTTF) \quad (20)$$

$$F_2(P) = \min(\text{outage_cost} + \text{maintenance_cost}) \quad (21)$$

هزینه خاموشی (outage_cost) و هزینه تعمیرات و نگهداری (maintenance_cost) به فرم روابط (۲۲) و (۲۳) نشان داده می‌شوند:

$$\text{outage_cost} = \sum_{i=1}^5 o_i \quad (22)$$

$$\text{maintenance_cost} = \sum_{i=1}^8 x_i * c_i \quad (23)$$

که پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

O₁: میانگین هزینه قطعی به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس در شبکه توزیع

O₂: میانگین هزینه قطعی به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس در شبکه انتقال

O₃: میانگین هزینه تغییر پخش بار به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس در شبکه توزیع

O₄: میانگین هزینه تغییر پخش بار به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس در شبکه انتقال

O₅: میانگین هزینه خسارت تجهیزات به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس

$$\lambda_{at-tb}^{new} = \lambda_{at-tb}^{old} * \left(\frac{\rho_{m-tb}^{old}}{\rho_{m-tb}^{new}} \right) \quad (12)$$

باید در نظر گرفت با تغییر برنامه نگهداری و تعمیرات تست بلاک و در نتیجه آن، تغییر تعداد خرابی این تجهیز، تعداد دفعات ورود به تست at نیز تغییر می‌کند؛ در نتیجه، با توجه به روابط (۱) و (۲)، این تغییر در تعداد دفعات ورود به این حالت بر مقادیر نرخ انتقال خروجی‌های این حالت (λ_{at-tb} ، ρ_{tr-at} و μ_{t-at}) نیز تأثیر می‌گذارد. برای محاسبه این تغییرات از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$S_1 = \lambda_{at-tb}^{old} + \rho_{tr-tb}^{old} + \mu_{t-at}^{old} \quad (13)$$

$$S_2 = \lambda_{at-tb}^{new} + \rho_{tr-tb}^{old} + \mu_{t-at}^{old} \quad (14)$$

$$\lambda_{at-tb}^{final} = \lambda_{at-tb}^{new} * \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad (15)$$

$$\rho_{tr-at}^{final} = \rho_{tr-at}^{old} * \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad (16)$$

$$\mu_{t-at}^{final} = \mu_{t-at}^{old} * \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad (17)$$

S₂ برابر مجموع نرخ‌های انتقال خروجی از حالت تست at هستند.

برای دیگر تجهیزات نیز این محاسبات به همین صورت است و برای هر تجهیز، تأثیر تغییرات خرابی تجهیزاتی که پس از تجهیز مدنظر تست می‌شوند، در ضرایب مربوطه در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه در جدول (۱) برای وایرینگ‌های AC و DC، نیازداشتن به نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی شده انتخاب شد، دو ضریب انتقال مربوط به آنها (X₉ و X₁₀) برابر صفر بوده است و جزء پارامترهای بهینه‌سازی نخواهند بود؛ در نتیجه، ۸ پارامتر به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در مسئله برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات انتخاب می‌شوند. رابطه (۱۸) نشان‌دهنده بردار پارامترهای بهینه‌سازی خواهد بود:

$$P = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8] = \quad (18)$$

$$[\rho_{m-at}, \rho_{m-mc}, \rho_{m-tb}, \rho_{m-dr}, \rho_{t-dr}, \rho_{m-dt}, \rho_{m-lt}, \rho_{t-co}]$$

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

هزینه خسارت تجهیزات به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس (O₅) در نظر گرفته شده است.

هزینه‌های فعالیت‌های مرتبط با نگهداری و تعمیرات (C₁ تا C₈) شامل هزینه پرسنل و ابزار نگهداری و تعمیرات‌اند. شایان ذکر است وجود رابطه غیرخطی (۳) در روند محاسبه قابلیت اطمینان سیستم حفاظت دیستانس، دلیل استفاده از الگوریتم تکاملی به جای روش‌های ریاضی در یافتن جواب بهینه است. همچنین، با توجه به اینکه دو هدف ذکر شده در راستای بهینه‌سازی در یک راستا نیستند، بهینه‌سازی چندهدفه (Multi Objection) استفاده شده است.

۴- نتایج عددی

در این بخش، اعمال روش پیشنهادی بر دو پست فوق توزیع با استفاده از داده‌های واقعی (به دست آمده از شرکت سهامی مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران "توانیر")، ارائه و عملکرد روش پیشنهادی بررسی شده است. تفاوت این دو پست از نظرات مختلف، دلایلی است که موجب می‌شود ضمن شباهت مدارها و استفاده از یک روش برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، برنامه‌های متفاوتی برای آنها نتیجه شود. این تفاوت‌ها عبارت‌اند از:

- ۱) جایگاه آنها در شبکه برق (مؤثر بر قابلیت اطمینان مدنظر و ضرایب انتقال مربوطه)؛
- ۲) وضعیت آب‌وهوایی متفاوت (مؤثر بر ضرایب انتقال مرتبط با نرخ خرابی [۳۲])؛
- ۳) برنامه نگهداری و تعمیرات پیشین متفاوت (مؤثر بر محاسبه ضرایب انتقال).

گفتنی است بار تغذیه شده با پست دوم، یک بار صنعتی است و در مقایسه با پست اول که یک بار ترکیبی کشاورزی - خانگی را تغذیه می‌کند، میزان قابلیت اطمینان پذیرفتنی برای مشترک بالاتر بوده است [۳۳]؛ در نتیجه، باید نقطه کار با قابلیت اطمینان بالاتر انتخاب شود.

جدول (۲)، مقادیر فعلی برنامه نگهداری و تعمیرات را در این دو پست نشان می‌دهد. برنامه نگهداری و تعمیرات در پست اول، مبتنی بر TBM و در پست دوم مبتنی بر CBM است.

و
C₁: C_{m-at} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری ترمینال‌های AC)

C₂: C_{m-mc} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری مدارشکن‌های میناتور)

C₃: C_{m-tb} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری تست بلاک)

C₄: C_{m-dr} (هزینه فعالیت اقتضائی رله دیستانس)

C₅: C_{t-dr} (هزینه فعالیت جستجوی شکست رله دیستانس)

C₆: C_{m-dt} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری ترمینال‌های DC)

C₇: C_{t-lr} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری رله lockout)

C₈: C_{m-ic} (هزینه فعالیت تعمیرات و نگهداری کویل تریپ)

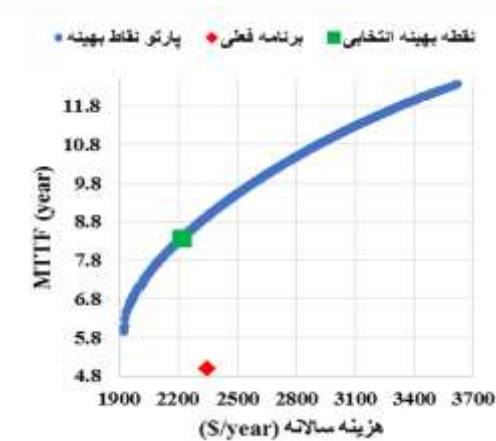
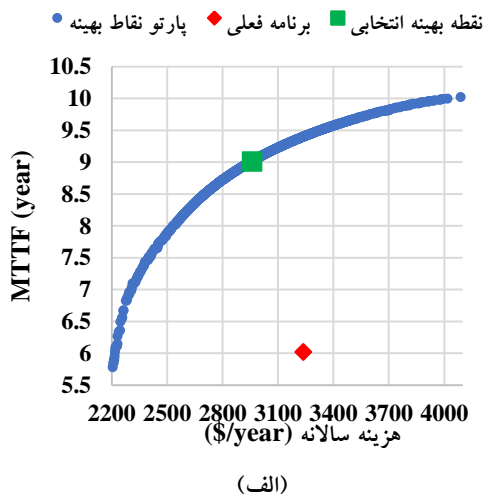
هزینه‌های قطعی (O₁ و O₂) با مجموع هزینه‌های عدم تأمین توان مصرف‌کننده و هزینه‌های وارده بر تولیدکنندگان به علت نبود تولید توان برابر می‌شود.

هزینه‌های تغییر پخش بار (O₃ و O₄) برابر هزینه‌های پخش بار جدید سیستم به علت خرابی سیستم حفاظت دیستانس، مانند هزینه‌های سوئیچ‌زنی، هزینه‌های تلفات و ... است. با توجه به خروج ناخواسته تجهیزات از شبکه، بار تجهیزات باقی‌مانده، از جمله ترانسفورماتورها و خطوط افزایش می‌یابد و لازم است تغییراتی در آرایش شبکه ایجاد شود تا بتوان در بهترین حالت ممکن و با بیشترین قابلیت اطمینان از شبکه بهره‌برداری کرد. این امر، تغییر بار تجهیزات موجود و ورود تجهیزات جدید در بخش فوق توزیع و انتقال را موجب می‌شود؛ بنابراین، با انجام پخش بار جدید و مقایسه با پخش بار قبل از خطا، محاسبه تغییر تلفات شبکه و همچنین، هزینه تجهیزات در مدار آورده شده، O₃ و O₄ محاسبه می‌شوند.

به علت طولانی شدن زمان خطا، به دلیل خرابی سیستم حفاظت دیستانس، جریان اتصال کوتاه به مدت بیشتری از تجهیزات عبور می‌کند که این موضوع ممکن است به برخی از تجهیزات، مانند ترانسفورماتورهای قدرت و ترانسفورماتورهای جریان آسیب بزند. این هزینه در میانگین

جدول (۲): پارامترهای فعلی دو پست مطالعه شده

پست اول (1/year)	پست دوم (1/year)	پارامتر	نرخ انتقال به فعالیت
-	-	ρ_{m-at}	بازسازی ترمینال‌های AC
۰/۲۵	۰/۵	ρ_{m-mc}	بازسازی مدارشکن‌های مینیاتوری
۱	۰/۵	ρ_{m-tb}	اقتضائی تست بلاک
۱	۰/۲۵	ρ_{m-dr}	اقتضائی رله دیستانس
۰/۲۵	۰/۵	ρ_{t-dr}	جستجوی شکست رله دیستانس
۱	۰/۲۵	ρ_{m-dt}	بازسازی ترمینال‌های DC
۱	۰/۵	ρ_{t-tr}	جستجوی شکست رله lockout
-	-	ρ_{m-tc}	بازسازی کویل تریپ



شکل (۳): پارتو خروجی بهینه‌سازی؛ الف) سیستم اول،

ب) سیستم دوم

در ابتدا باید ضرایب زنجیره مارکوف برای این دو سیستم محاسبه شود که در این راستا از سوابق نگهداری و تعمیرات و خرابی تجهیزات استفاده می‌شود. سپس شاخص MTTF فعلی این دو سیستم با استفاده از روابط مارکوف محاسبه می‌شود.

در ادامه، مقادیر هزینه فعلی شامل هزینه خاموشی و هزینه نگهداری و تعمیرات به صورت میانگین سالانه محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم تکاملی برنامه بهینه نگهداری و تعمیرات برای هر پست به دست می‌آید. به این منظور، برای هر سیستم الگوریتم تکاملی میگو اعمال شده است و نتایج خروجی به دست آمده که در شکل (۳) آورده شده‌اند.

همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، با توجه به دو هدفه بودن بهینه‌سازی، نتایج به صورت پارتو هستند و محورهای افقی و عمودی به ترتیب نشان‌دهنده دو تابع بهینه‌سازی (هزینه و شاخص قابلیت اطمینان) هستند. این شکل‌ها شامل مجموعه نقاط پارتو، نقطه کار فعلی و نقطه انتخابی بهینه‌اند.

نگاه سیستمی در اعمال روش RCM بر سیستم حفاظت دیستانس خطوط

۱- نقطه کار ۱: نقطه کار با نزدیکترین هزینه به حالت کار فعلی؛
 ۲- نقطه کار ۲: نقطه کار با نزدیکترین قابلیت اطمینان به حالت کار فعلی؛
 ۳- نقطه کار ۳: نقطه بهینه نهایی (مصالحه‌ای بین هزینه و قابلیت اطمینان مورد انتظار مشترک).
 نقطه کار ۱، به این دلیل انتخاب شده است که بررسی شود با صرف هزینه یکسان، آیا روش پیشنهادی می‌تواند قابلیت اطمینان بالاتری در سیستم را تضمین کند یا خیر.
 نقطه کار ۲، مقادیر قابلیت اطمینان در روش فعلی و نقطه انتخابی برابر است و هدف، بررسی این است که آیا می‌توان با روش پیشنهادی با هزینه کمتر، به این سطح از قابلیت اطمینان رسید یا خیر.

نقطه کار ۳، بر مبنای انتخاب فرد خیره سیستم انتخاب می‌شود. به عبارت بهتر، بهره‌بردار سیستم این انتخاب را از میان نقاط موجود در پرتو و با در نظر گرفتن اهمیت بارهای تغذیه‌شونده توسط هر پست و قابلیت اطمینان مورد انتظار مشترکان متصل به پست انجام می‌دهد. بهره‌بردار از این نقطه به‌عنوان جواب نهایی مسئله استفاده می‌کند.

نتایج این بهینه‌سازی‌ها شامل ضرایب بهینه‌سازی و مقادیر هدف برای دو سیستم حفاظت دیستانس در جدول‌های (۳) و (۴) آمده‌اند. با توجه به اینکه مقادیر بهینه فواصل نگهداری و تعمیرات به‌دست‌آمده در بهینه‌سازی به‌صورت اعشار بوده است و اعمال آنها به‌صورت دقیق منطقی و امکان‌پذیر نیست، باید مقادیر اصلاحی با آنها جایگزین [۵] و هزینه و قابلیت اطمینان متناظر با این مقادیر اصلاحی محاسبه شود؛ برای مثال، با توجه به جدول (۳)، نرخ انتقال به فعالیت اقتضائی رله دیستانس ρ_{m-dr} در نقطه کار ۳، برابر $0/38$ به دست آمده است؛ یعنی این فعالیت تعمیر و نگهداری در دوره‌های $2/63$ ساله باید انجام شود که نزدیکترین دوره‌های زمانی برای انجام این فعالیت دوره $2/5$ ساله یا دوره 3 ساله است. حاصل انتخاب دوره $2/5$ ساله، قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه بیشتر و حاصل انتخاب دوره 3 ساله، قابلیت اطمینان پایین‌تر و هزینه کمتر است؛ بنابراین،

با توجه به تفاوت اهمیت بارهای تغذیه‌شده با پست‌ها و قابلیت اطمینان متفاوت مورد انتظار مشترک برای هر پست، نقطه انتخابی از مجموعه نقاط پارتو انتخاب می‌شود. مطابق شکل، با توجه به دو هدفه بودن بهینه‌سازی، نتایج به‌صورت پارتو هستند و محورهای افقی و عمودی به‌ترتیب دو تابع بهینه‌سازی هزینه و شاخص قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند. این شکل‌ها شامل مجموعه نقاط پارتو، نقطه کار فعلی و نقطه انتخابی بهینه‌اند. با توجه به تفاوت اهمیت بارهای تغذیه‌شده با پست‌ها و قابلیت اطمینان متفاوت مورد انتظار مشترک برای هر پست، نقطه انتخابی از مجموعه نقاط پارتو انتخاب می‌شود.

جدول (۳): مقادیر فعلی و بهینه پارامترها و اهداف بهینه‌سازی برای پست شماره ۱

پارامتر	برنامه فعلی	نقطه کار ۱	نقطه کار ۲	نقطه کار ۳	برنامه بهینه اصلاح‌شده
ρ_{m-at} (1/year)	-	0/2	0/2	0/22	0/2
ρ_{m-mc} (1/year)	0/5	1	1	1	1
ρ_{m-tb} (1/year)	0/5	0/95	0/66	1	1
ρ_{m-dr} (1/year)	0/25	0/43	0/21	0/38	0/4
ρ_{t-lr} (1/year)	0/5	0/47	0/27	0/42	0/4
ρ_{m-dt} (1/year)	0/25	0/8	0/54	0/7	0/66
ρ_{t-lr} (1/year)	0/5	0/57	0/34	0/51	0/5
ρ_{m-tc} (1/year)	-	0/46	0/21	0/43	0/4
هزینه سالانه (\$/year)	2349/1	2348/8	1926/8	2216/9	2184/5
MTTF (year)	4/98	8/92	5/93	8/35	8/18

به‌منظور تحلیل عملکرد روش پیشنهادی، حالت فعلی پست‌ها با سه نقطه کار از مجموعه پارتو مقایسه شده‌اند. این سه نقطه کار به‌صورت زیر مشخص می‌شوند:

۱	۱	۰/۸۹	۱	۱	ρ_{m-dt} (1/year)
۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۷۳	۱	ρ_{t-tr} (1/year)
۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۳۸	۰/۹۵	-	ρ_{m-tc} (1/year)
۳۰۰۹/۸	۲۹۵۹/۴	۲۲۱۷/۸	۳۲۳۸/۹	۳۲۳۸/۱	هزینه سالیانه (\$/year)
۹/۱	۹	۶/۰۱	۹/۳۹	۶/۰۱	MTTF (year)

- سیستم حفاظت دیستانس در پست دوم

برنامه نگهداری و تعمیرات فعلی استفاده شده برای این پست، یک برنامه CBM است که برای فعالیت بازسازی مدارشکن مینیاتوری و فعالیت جستجوی شکست رله دیستانس اهمیت کمتری تشخیص داده است. این برنامه فاصله زمانی چهار سال را برای وظایف نگهداری و تعمیرات آنها پیشنهاد کرده و برای بقیه تجهیزات بازه یک سال انتخاب شده است. با توجه به نتایج جدول (۴)، در ستون نقطه کار ۱ مشاهده می شود روش پیشنهادی یک برنامه نگهداری و تعمیرات با هزینه تقریباً برابر حالت فعلی و با بهبود ۱/۵۶ برابری در قابلیت اطمینان ارائه کرده است. همچنین، نقطه کار ۲ نشان دهنده یک برنامه نگهداری و تعمیرات با قابلیت اطمینان برابر برنامه فعلی است که هزینه سالانه آن بیش از ۳۰٪ کاهش داشته است. در نهایت، برنامه بهینه پیشنهادی با روش ارائه شده و حالت اصلاح شده آن، قابلیت اطمینان و هزینه سالانه را بهبود بخشیده است.

با توجه به نتایج، در برنامه نگهداری و تعمیرات جدید، تعداد دفعات نگهداری و تعمیرات برخی تجهیزات افزایش یافته است که تأثیر بالای این تجهیزات در قابلیت اطمینان را نشان می دهد. همچنین، تعداد دفعات نگهداری و تعمیرات برخی دیگر کاهش یافته است که تأثیر کم آنها در قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی پست مربوطه را نشان می دهد؛ در نتیجه، روش پیشنهادی در این مقاله، در مقایسه با اعمال RCM فقط روی رله، تأثیر سایر تجهیزات در قابلیت اطمینان را نیز به خوبی مدل کرده است و با

دوره ۲/۵ ساله برای این فعالیت انتخاب شد و در نتیجه، ρ_{m-dr} به ۰/۴ تغییر یافت.

با توجه به جدول های (۳) و (۴)، تحلیل های زیر بیان می شوند:

- سیستم حفاظت دیستانس در پست اول

مطابق جدول (۳)، برنامه نگهداری و تعمیرات فعلی استفاده شده در این پست یک برنامه TBM است که وظایف نگهداری و تعمیراتی برای ترینال های AC و تریپ کویل در نظر گرفته نشده است. با توجه به TBM بودن برنامه فعلی، اهمیت تجهیزات در برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات دیده نشده است و انتظار می رود برنامه بهینه به دست آمده از روش پیشنهادی به صورت بسیار محسوس قابلیت اطمینان بهتری را ارائه دهد. برتری تمامی نقاط پارتو در شکل (۳-الف) نسبت به نقطه فعلی نشان دهنده این موضوع است. با توجه به نتایج جدول (۳)، در ستون نقطه کار ۱ مشاهده می شود روش پیشنهادی یک برنامه نگهداری و تعمیرات با هزینه برابر حالت فعلی و با بهبود ۱/۸ برابری در قابلیت اطمینان ارائه کرده است. همچنین، نقطه کار ۲ نشان دهنده یک برنامه نگهداری و تعمیرات با نزدیک ترین قابلیت اطمینان به برنامه فعلی است که مطابق با اطلاعات مربوط به نقطه کار ۲، هزینه سالانه آن بیش از ۱۷٪ کاهش داشته است. در نهایت، دیده می شود برنامه بهینه پیشنهادی این مقاله و حالت اصلاح شده آن، قابلیت اطمینان و هزینه سالانه را بهبود بخشیده است.

جدول (۴): مقادیر فعلی و بهینه پارامترها و اهداف بهینه سازی

برای پست شماره ۲

پارامتر	برنامه فعلی	۱	۲	۳	اصلاح شده
ρ_{m-at} (1/year)	-	۰/۶۹	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۵
ρ_{m-mc} (1/year)	۰/۲۵	۱	۱	۱	۱
ρ_{m-tb} (1/year)	۱	۱	۰/۷۶	۱	۱
ρ_{m-dr} (1/year)	۱	۱	۰/۶۸	۱	۱
ρ_{t-dr} (1/year)	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۲۲	۰/۴۸	۰/۵

اول باید هر دو سال و نیم، یک بار و برای پست دوم، هر یک سال، یک بار صورت گیرد. اطلاعات تکمیلی درباره این کاربرد در [۵] موجود است.

۵- نتیجه گیری

با توجه به تأثیر بالای سیستم حفاظت دیستانس خطوط در قابلیت اطمینان، هزینه‌های شبکه انتقال قدرت و کارایی بالای روش RCM نسبت به دیگر روش‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، در این مقاله روش جدیدی برای تعیین برنامه نگهداری و تعمیرات حفاظت دیستانس خطوط ارائه شد. ماهیت عملکرد نهان سیستم‌های حفاظتی، مهم‌ترین مشکل در پیاده‌سازی RCM در این گونه سیستم‌ها است که مقاله حاضر توانسته است ضمن رفع این مشکل، ماهیت رفتاری عملکرد نهان در سیستم‌های حفاظتی را مدل کند. به این منظور در این مقاله، مفهوم نگاه سیستمی به جای نگاه تجهیزاتی در فرایند اعمال RCM پیشنهاد شد. با استفاده از این مفهوم، ماهیت عملکرد نهان سیستم حفاظتی مدنظر گرفته شده و همچنین، تأثیر کلیه تجهیزات موجود در سیستم حفاظتی در کنار یکدیگر بر قابلیت اطمینان مشاهده شده و برای هر تجهیز برنامه نگهداری و تعمیرات ارائه شده است. اعمال روش پیشنهادی بر داده‌های واقعی دو سیستم حفاظت دیستانس خط در دو پست مختلف و مقایسه برنامه نگهداری و تعمیرات به دست آمده با سوابق پیشین شبکه، نشان داد روش پیشنهادی به‌خوبی تأثیر تجهیزات بر قابلیت اطمینان را در نظر گرفته و برنامه‌ای با قابلیت اطمینان بالا و هزینه کمتر ارائه کرده است که قابلیت بالای روش پیشنهادی در کاربردهای واقعی شبکه برق را نشان می‌دهد.

بهینه‌سازی برنامه نگهداری و تعمیرات آنها قابلیت اطمینان و هزینه کل را بهبود بخشیده است.

گفتنی است روش پیشنهادی، کلیه حالات خرابی هر تجهیز در بخش‌های مختلف آنها را در نظر گرفته است. پس این روش ضمن بررسی قابلیت اطمینان و هزینه کل سیستم حفاظتی، نوع برنامه نگهداری و تعمیرات هر تجهیز را متناسب با بخش‌های مختلف آنها ارائه کرده است.

در نتیجه، روش پیشنهادی ضمن پوشش کامل هر تجهیز، از جمله رله، دیگر تجهیزات را مدنظر گرفته و همچنین، این نگاه سیستمی، روند محاسبه قابلیت اطمینان را به‌صورت صحیحی مدل کرده است.

در پایان، کاربرد RCM به‌عنوان خروجی نهایی این روش برای برنامه نگهداری و تعمیرات بهینه سیستم حفاظت دیستانس در دو پست مطالعه‌شده، در جدول (۵) ارائه شده است. دو ستون اول مطابق با جدول (۱) هستند. ستون‌های ۳ تا ۱۲ مربوط به سؤالات موجود در فلوجارت تصمیم‌گیری RCM با توجه به نمادهای این سؤالات اند و حروف Y (بله) و N (خیر)، با پاسخ به آنها برای هر تجهیز متناظرند. فعالیت پیشنهادی با جزئیات در ستون بعدی آمده است. مواقعی که «-» به‌عنوان فعالیت پیشنهادی آورده شده، نشان‌دهنده مدهای خرابی است که برای آنها «نیازداشتن به فعالیت زمان‌بندی‌شده» انتخاب شده است. دو ستون آخر نیز بیان‌کننده فواصل بهینه‌نهایی وظایف نگهداری و تعمیرات دو سیستم مطالعه‌شده است؛ به‌طور مثال، برای رله دیستانس و دومین مد خرابی آن (۵ در ستون اول و ب در ستون دوم)، فعالیت اقتضائی زمان‌بندی‌شده (با توجه به جدول ۱) انتخاب شده و فعالیت پیشنهادی شامل تست الکتریکی رله است. این فعالیت برای پست

جدول (۵): کاربرد RCM برای سیستم حفاظت دیستانس در دو پست

فواصل اولیه	اقدامات پیش‌فرض			ارزیابی پیامد							تجهیز	
	H3 S3 O3 N3	H2 S2 O2 N2	H1* S1 O1 N1	O	E	S	H	مد خرابی				
پست دوم	فعالیت پیشنهادی	S4	H5	H4								
۲	۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N				N	آ
-	-	-	N	N	N	N	N				N	ب
۲	۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N				N	ت

-	-	-	N	N	N	N	N	N	ث	
۲	۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ج	
۲	۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ح	
-	-	-	N	N	N	N	N	N	خ	
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	آ	
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ب	
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ت	۲
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ث	
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ج	
۱	۱/۵	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	ح	
۱	۱	بررسی اتصالات ترمینال				Y	N	N	آ	۳
۱	۱	تست الکتریکال - تست تحت بار				Y		N	آ	۴
۲	۲/۵	تست الکتریکال**	Y	N	N	N		N	آ	
۱	۲/۵	تست الکتریکال				Y		N	ب	۵
۲	۲/۵	تست الکتریکال - تست مخصوص***	Y	N	N	N		N	ت	
-	-	-	N	N	N	N	N	N	آ	۶
-	-	-	N	N	N	N	N	N	آ	۷
-	-	-	N	N	N	N	N	N	ب	
۱/۵	۲	تست الکتریکال - تست مخصوص		Y	N	N	N	N	آ	۸
۱/۵	۲/۵	سرویس و تست سویچ	Y	N	N	N		N	آ	۹

* H1, S1, O1, N1, H2, S2, O2, H3, N2, S3, O3, N3, H4, S4, O4, H5, S5, O5 در مرجع [۵] تعریف شده‌اند.

** این تست شامل تست فانکشن‌های اصلی رله است.

*** این تست شامل تست ورودی‌ها و خروجی‌های رله و همچنین پیکره‌بندی رله است.

Transactions on Reliability, Vol. 66, pp. 202-218, 2017.

- [5] J. Moubray, Reliability-centered maintenance: Industrial Press Inc., 1997.
- [6] A. Koksal and A. Ozdemir, "Improved transformer maintenance plan for reliability centred asset management of power transmission system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, pp. 1976-1983, 2016.
- [7] C. Zhang, W. Gao, S. Guo, Y. Li, and T. Yang, "Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance," *Renewable Energy*, Vol. 103, pp. 606-612, 2017.
- [8] A. R. S. Queiroz, E. C. Senger, L. C. L. Queiroz, E. Rangel, and V. S. de Paula, "Maintenance Strategy for Electrical Equipment Based on Integrated Operations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, pp. 3189-3197, 2017.

مراجع

- [1] R. Ahmad and S. Kamaruddin, "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 63, pp. 135-149, 2012.
- [2] M. Yildirim, X. A. Sun, and N. Z. Gebraeel, "Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling—Part I: Maintenance problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, pp. 4253-4262, 2016.
- [3] K. Sabri-Laghaie and R. Noorossana, "Reliability and Maintenance Models for a Competing-Risk System Subjected to Random Usage," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 65, pp. 1271-1283, 2016.
- [4] M. Zhang and M. Revie, "Continuous-observation partially observable semi-Markov decision processes for machine maintenance," *IEEE*

- [21] M. D. Berrade, P. A. Scarf, and C. A. Cavalcante, "Some insights into the effect of maintenance quality for a protection system," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 64, pp. 661-672, 2015.
- [22] H. Leite, B. Soares, and S. Costa, "Condition-based maintenance: A forward step on the power system protection maintenance at the Portuguese transmission system operator," 2016.
- [23] "PRC-005-2 Protection — System Maintenance Supplementary Reference (Draft 1)," Protection System Maintenance and Testing Standard Drafting Team, ed: North American Electric Reliability Corporation (NERC), 2009.
- [24] M. Rafiei, M. Khooban, M. Afshari-Igder, J. Boudjadar. "A Novel Approach to Overcome the Limitations of Reliability Centered Maintenance Implementation on the Smart Grid Distance Protection System." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019.
- [25] S. Li and Y. Hua, "Short-term reliability evaluation of protection systems in smart substations based on equivalent state spaces following semi-Markov process," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, pp. 2225-2230, 2016.
- [26] K. Hou, H. Jia, X. Xu, Z. Liu, and Y. Jiang, "A continuous time Markov chain based sequential analytical approach for composite power system reliability assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, pp. 738-748, 2016.
- [27] J. Dong, F. Gao, X. Guan, Q. Zhai, and J. Wu, "Storage Sizing With Peak-Shaving Policy for Wind Farm Based on Cyclic Markov Chain Model," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 8, pp. 978-989, 2017.
- [28] A. H. Gandomi and A. H. Alavi, "Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 17, No. 12, pp. 4831-4845, 2012.
- [29] H. Ahmadi, A. Rajaei, M. Nayeripour, and M. Ghani, "A Hybrid Control Method to Improve LVRT and FRT in DFIG by Using the Multi-Objective Algorithm of Krill and the Fuzzy Logic," (in eng), *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2018.
- [30] G. Uğur, and E. Kaymaz, "Economic Dispatch Integrated Wind Power Using Coyote Optimization Algorithm." 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG). IEEE, 2019.
- [31] K. Chandram, D. Rajababu, and K. Raghuram, "Optimal Bidding Strategy in Deregulated Power Market Using Krill Herd Algorithm." *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering*. Springer, Singapore, 2019.
- [32] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*: Springer, 1992.
- [33] R. Subramaniam, R. Billinton, and G. Wacker, "Factors affecting the development of an industrial customer damage function," *IEEE transactions on power apparatus and systems*, pp. 3209-3215, 1985.
- [9] D. Piasson, A. A. Biscaro, F. B. Leão, and J. R. S. Mantovani, "A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, Vol. 137, pp. 41-50, 2016.
- [10] F. Pourahmadi, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, "Identification of critical generating units for maintenance: A game theory approach," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, pp. 2942-2952, 2016.
- [11] R. Ghorani, M. Fotuhi-Firuzabad, P. Dehghanian, and W. Li, "Identifying critical components for reliability centred maintenance management of deregulated power systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, pp. 828-837, 2015.
- [12] L. Belak, R. Marusa, R. Ferlic, and J. Pihler, "Strategic maintenance of 400-kV switching substations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, pp. 394-401, 2013.
- [13] H. A. Aldhubaib and M. M. Salama, "A novel approach to investigate the effect of maintenance on the replacement time for transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, pp. 1603-1612, 2014.
- [14] M. Abbasghorbani, H. R. Mashhadi, and Y. Damchi, "Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, pp. 1583-1590, 2014.
- [15] F. Pourahmadi, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, "Application of Game Theory in Reliability-Centered Maintenance of Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, pp. 936-946, 2017.
- [16] J.-H. Heo, M.-K. Kim, G.-P. Park, Y. T. Yoon, J. K. Park, S.-S. Lee, et al., "A reliability-centered approach to an optimal maintenance strategy in transmission systems using a genetic algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, pp. 2171-2179, 2011.
- [17] J. Heo, M. Kim, and J. Lyu, "Implementation of reliability-centered maintenance for transmission components using particle swarm optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 55, pp. 238-245, 2014.
- [18] B. Yssaad and A. Abene, "Rational reliability centered maintenance optimization for power distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 73, pp. 350-360, 2015.
- [19] D. R. Doan, "Prioritizing Circuit Breaker and Protective Relay Maintenance Using an Arc Flash Hazard Assessment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, pp. 799-802, 2013.
- [20] J. Jedrzejczak, G. Anders, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Farzin, and F. Aminifar, "Reliability Assessment of Protective Relays in Harmonic-Polluted Power Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, pp. 556-564, 2017.

¹ TBM: Time Based Maintenance

² CBM: Condition Based Maintenance

³ SAIDI: System Average Interruption Duration Index

⁴ SAIFI: System Average Interruption Frequency Index

⁵ Mean Time To Failure

