

بررسی تحلیلی روش‌های بهینه‌سازی بازه زمانی نگهداری و تعمیرات تجهیزات سیستم‌های قدرت

محمد زارعی، منصور عبدی، فرهاد شبیهی

شرکت برق منطقه‌ای باختر

اراک، ایران

تقسیم می‌شود. CM شامل اقدامات تعمیر یا تعویض پس از خرابی^۵ تجهیزات و PM شامل اقدامات به منظور پیشگیری از خرابی است.

با وجود سیستم مانیتورینگ تجهیزات و به‌صرفه بودن آن از نت پیشگیرانه مبتنی بر شرایط (CBM)^۶ و در غیر اینصورت از نت مبتنی بر زمان (TBM)^۷ در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده بهره گرفته می‌شود. در صورتیکه برنامه PM بر اساس دغدغه‌های قابلیت اطمینان و با توجه به شرایط هر تجهیز و اهمیت آن در سیستم طراحی شود، به آن نگهداری و تعمیرات بر محور قابلیت اطمینان (RCM)^۸ اتلاق می‌شود [۱].

یکی از چالش‌های اجرای PM در قالب RCM، تعیین نرخ بهینه نت یا همان زمانبندی PM می‌باشد. تاکنون روش‌های گوناگونی در این زمینه ارائه شده است که در این مقاله تعدادی از آنها مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته‌اند. این روش‌ها در بخش‌های ۲ تا ۴ در سه گروه اصلی روش‌های مبتنی بر تصمیم‌سازی و الگوریتم‌های تکاملی و فازی، روش‌های مبتنی بر ماتریس ریسک و روش‌های تحلیلی-ریاضی دسته‌بندی و شرح داده می‌شوند. در این میان روش‌های تحلیلی با توجه به برخورداری از اعتبار نتایج و امکان مدلسازی عملیات نت، توجه بیشتری را به خود جلب نموده‌اند. از جمله مهمترین روش‌های تحلیلی می‌توان به روش‌های مبتنی بر مدل مارکوف^۹ اشاره نمود که بصورت تفصیلی در بخش ۵ مرور می‌شوند. نهایتاً نتیجه‌گیری مطالب مورد اشاره نیز در بخش آخر ارائه می‌شود.

چکیده — نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) بخشی از برنامه نگهداری و تعمیرات بر محور قابلیت اطمینان (RCM) می‌باشد. انتخاب مناسب‌ترین اقدامات پیشگیری از خرابی و تعیین دوره زمانی بهینه آنها، یکی از مهمترین چالش‌های صنایع می‌باشد. با توجه به اهمیت نگهداری و تعمیرات در بخش بهره‌برداری تجهیزات سیستم قدرت، در این مقاله به بررسی تحلیلی روش‌های بهینه‌سازی برنامه PM پرداخته می‌شود. از این میان روش‌های مبتنی بر مدل مارکوف که در دسته‌بندی ارائه شده در این مقاله از جمله روش‌های تحلیلی-ریاضی بر مبنای احتمالات می‌باشند، مورد بررسی بیشتری قرار گرفته‌اند. مجموع ارزیابی‌های صورت گرفته در این مطالعه می‌تواند راهنمای مناسبی برای پژوهشگران، مهندسان مشاور و بهره‌برداران در طراحی یک برنامه PM مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از دارایی‌ها از منظر هزینه و قابلیت اطمینان باشد.

واژه‌های کلیدی — نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)؛ ماتریس ریسک؛ مدل مارکوف؛ قابلیت اطمینان.

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی و کیفیت نگهداری و تعمیرات (نت)^۱ نقش مهمی در طول عمر تجهیزات، قابلیت اطمینان^۲ سیستم و هزینه‌های مصرفی دارد. نگهداری و تعمیرات به دو دسته کلی نت اصلاحی (CM)^۳ و نت پیشگیرانه (PM)^۴

⁵. Failure

⁶. Condition-based maintenance

⁷. Time-based maintenance

⁸. Reliability centered maintenance

⁹. Markov model

¹. Maintenance

². Reliability

³. Corrective maintenance

⁴. Preventive maintenance

۲. روش‌های مبتنی بر تصمیم‌سازی و

الگوریتم‌های تکاملی و فازی

روش‌های مبتنی بر تصمیم‌سازی^{۱۰} معمولاً جدولی از برنامه اقدامات نت یا اقدامات و بازه زمانی نت را تعریف نموده و با استفاده از روش‌های تصمیم‌سازی و بهینه‌سازی، اقدام به انتخاب مناسب‌ترین برنامه از پیش تعیین شده می‌نمایند. در صورت محدود بودن اقدامات و دوره زمانی نت، این روش‌ها می‌توانند مؤثر باشند اما معمولاً مکانیزم مشخصی برای تعیین برنامه‌های از پیش تعیین شده و تشکیل جدول تصمیم‌گیری ارائه نمی‌شود. بنابراین کاربردشان محدود است؛ به‌ویژه زمانی که برآورد اولیه درستی از برنامه زمانی نت، موجود نباشد. از این گذشته، معمولاً اقدامات نت، محدود بوده و چندان ابتکار عملی در این حوزه وجود ندارد. اگرچه برخی با فرض اینکه در روش‌های تحلیلی-ریاضی، تعیین اهداف و قیود مشکل است و نمی‌توان به نتایج دقیق و قابل اعتمادی رسید، به استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری روی می‌آورند؛ اما اینگونه روش‌ها خود دارای مجموعه‌ای از نامعینی‌ها بوده، تعیین پارامترهایشان بسیار به سلیقه افراد وابسته است و مبنای نظری مطمئنی ندارند. قسمتی از روش‌های ارائه شده در [۲]-[۷] را می‌توان در این دسته‌بندی قرار داد.

تعدادی از مراجع از جمله [۸]-[۱۳] نیز به ارائه روش‌هایی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی و یا فازی پرداخته‌اند که به نوعی می‌تواند در فرآیند تصمیم‌گیری کمک‌کننده باشد.

۳. روش‌های مبتنی بر ماتریس ریسک

در روش‌های مبتنی بر ماتریس ریسک برای تعیین اولویت نت تجهیزات به ارزیابی شرایط و اهمیت آنها پرداخته و برای هر تجهیز یک نمره دوتایی متناظر با شرایط و اهمیت اختصاص داده می‌شود. در صورتی که در فضای دو بعدی شرایط و اهمیت، نواحی درجه‌بندی شده مختلفی تعریف شوند، بسته به محل متناظر با آنها می‌توان تجهیزات را از نظر ریسک یا مخاطره‌پذیر بودن، گروه‌بندی نمود. معمولاً سه سطح احتیاج به PM تعریف می‌شود: کم، متوسط و زیاد. همچنین می‌توان به هر ناحیه یک ضریب افزایشی یا کاهش‌ی متناظر با سطح ریسک اختصاص داد که بر مبنای آن اقدام به افزایش یا کاهش دوره زمانی PM می‌شود. از جمله روش‌های ارائه شده در این زمینه می‌توان به روش‌های پیشنهادی در [۱۴]-[۲۰] اشاره نمود.

تعیین معیارهای شرایط و اهمیت و نمره‌های نظیر هر کدام و مرزبندی نواحی از جمله پارامترهایی می‌باشند که مبنای نظری و تحلیلی مشخصی ندارند و بیشتر وابسته به سیاست‌های سازمان و تجربیات بهره‌بردار و برنامه‌ریزی است. اگرچه مرجع [۱۴] مرزبندی نواحی را بر اساس میانگین انحراف از معیار نمونه‌ها معین نموده است (شکل ۱)، اما به هر حال این معیار نیز مبنای درستی ندارد، زیرا سطح ریسک هر تجهیز باید مستقل از تجهیزات دیگر باشد. به عبارت دیگر ممکن است سطح ریسک میانگین تجهیزات یک سیستم از نظر بهره‌بردار در سطح بحرانی باشد، در صورتیکه بر مبنای [۱۴] همیشه سطح ریسک میانگین در وضعیت متوسط قرار دارد زیرا این نوع ناحیه‌بندی ماتریس ریسک، برآوردی از سطح ریسک تجهیزات ارائه نمی‌دهد بلکه نسبت ریسک آنها را بیان می‌کند.

مرجع [۱۴] سه سطح اولویت نت معین نموده اما [۱۵] مستقیماً به تعیین اقدامات PM پرداخته است. مرجع [۱۵] سه سطح اهمیت کم، متوسط و زیاد را به ترتیب شامل اقدامات CM، TBM و CBM + TBM و همچنین سه سطح شرایط بد، مشکوک و خوب را به ترتیب شامل اقدامات بازرسی، تعمیر و تعویض در نظر گرفته است. به این ترتیب در فضای دو بعدی ماتریس ریسک، هر تجهیز یک نمونه متناظر با یک ترکیب دوتایی از اقدامات PM مذکور خواهد داشت. برآورد کلی ریسک برای هر تجهیز نیز از فاصله آن نمونه تا نقطه $(0,0)$ یا منحنی $y = -x$ قابل انجام است و می‌تواند در تعیین دوره زمانی نت نیز مورد توجه قرار گیرد. شکل ۲ نمایش کلی این نوع ماتریس ریسک می‌باشد.

استفاده از ماتریس ریسک می‌تواند برای تعیین کلی اقدامات، سنجش نسبت ریسک تجهیزات مختلف و بطور کلی اولویت‌بندی تجهیزات، مفید باشد اما در جهت تعیین برنامه زمانی نت قابلیت چندانی ندارد. برای تعیین دوره زمانی نت می‌توان یا بر اساس تجربیات و یا بر اساس روش‌های تحلیلی عمل نمود. اگرچه [۱۴] معتقد است که روش‌های تحلیلی دارای نامعینی در فرضیات و روال مدل‌سازی می‌باشند و نتایج آنها قابل اعتماد نیست، اما به نظر می‌رسد نامعینی و برآورد سلیقه‌ای در تعیین پارامترهای مربوط به مطالعه ماتریس ریسک بیشتر باشد. این درحالی است که روش‌های مبتنی بر ماتریس ریسک اصولاً قابلیت ارائه دوره زمانی پایه PM را ندارند. بنابراین ارائه یک برآورد اولیه از دوره زمانی نت با استفاده از روش‌های تحلیلی یک اقدام مجزا و مفید می‌باشد که روش‌های دیگر می‌توانند آن را تکمیل نمایند.

¹⁰. Decision-making

۵. روش‌های مدل‌سازی نت مبتنی بر فرآیندهای

مارکوف

مدل مارکوف متشکل از چندین حالت می‌باشد که با نرخ‌های انتقال به یکدیگر متصل می‌شوند. از این مدل می‌توان در مطالعه احتمالی یک فرآیند استفاده نمود. در زمینه بهینه‌سازی دوره زمانی نت، حالت‌های ممکن برای یک تجهیز از جمله حالت‌های روشن، نت و خرابی یا تعمیر را در نظر گرفته و عکس متوسط زمان حضور در یک حالت تا انتقال به حالت دیگر به عنوان نرخ انتقال بین حالت‌ها تعیین می‌گردد. با حل مدل مارکوف، احتمال حضور در حالت‌ها مشخص می‌شود. بنابراین می‌توان با تغییر نرخ نت، مجموع احتمال حضور در حالت‌های روشن یا همان موجودیت را به ازای نرخ‌های نت مختلف محاسبه نمود. در این میان به ازای نرخ‌های کوچک، به علت افزایش خروج ناشی از خرابی و اقدامات CM، و در نرخ‌های بزرگ، به علت افزایش خروج ناشی از اقدامات PM، موجودیت تجهیز کاهش می‌یابد و یک ماکزیمم موجودیت به ازای نرخ بهینه نت از منظر قابلیت اطمینان بدست می‌آید (شکل ۳). در صورت تخمین متوسط هزینه در هر وضعیت، می‌توان با ضرب این مقادیر در احتمال حضور در هر وضعیت، منحنی هزینه کل بر حسب نرخ نت را شکل داد که با همان منطبق پیشین، یک نرخ بهینه را از منظر اقتصادی نتیجه می‌دهد که در آن هزینه کل حداقل می‌گردد (شکل ۴). برای این منظور تاکنون مدل‌هایی ارائه شده است که مهمترین رویکردهای طراحی این مدل‌ها در ادامه بررسی می‌شوند.

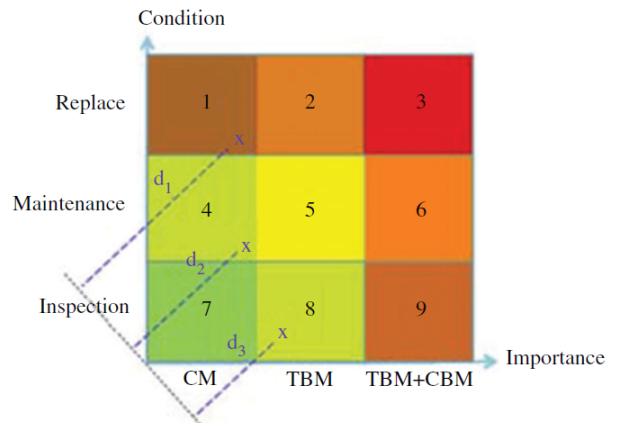
۵.۱. استفاده از مراحل عمر تجهیز به عنوان

وضعیت‌های فرسودگی

روند فرسودگی این مدل‌ها بلندمدت است و نهایتاً منجر به تعویض می‌گردد. نرخ‌ها برای دوره‌های مختلف عمر لحاظ می‌شوند. بنابراین در طول عمر تجهیز، یا می‌توان یک نرخ بهینه تقریباً ثابت در نظر گرفت و یا برای مراحل مختلف عمر، تعداد محدودی نرخ بهینه تعیین نمود. در این مدل‌ها باید از تمام وضعیت‌های نرمال و فرسودگی به وضعیت‌های تست و بازرسی، نت و خرابی تصادفی نرخ انتقال تعریف شود. همچنین در آن‌ها نرخ خرابی مانند دیگر مدل‌ها، ثابت فرض شده است. در حال حاضر با توجه به محاسبه نرخ‌های انتقال با استفاده از داده‌های ثبت شده متأثر از نرخ بازرسی و نت، با ثابت فرض نمودن نرخ خرابی و فرسودگی به ازای مقادیر مختلف نرخ نت و بازرسی، اثر پیشگیرانه نت بر ظرفیت خرابی تجهیز لحاظ نمی‌شود. شکل ۵ مدل ارائه شده در [۳۰]-[۳۲] و شکل ۶ مدل ارائه شده در [۲۱] را نشان

	$\mu_1 - 2 \times \sigma_1$	$\mu_1 + 2 \times \sigma_1$		
Condition index	$\mu_c + 2 \times \sigma_c$	1	2	3
	μ_c	4	5	6
	$\mu_c - 2 \times \sigma_c$	7	8	9
	$\mu_1 - 2 \times \sigma_1$	$\mu_1 + 2 \times \sigma_1$		
	Importance index			

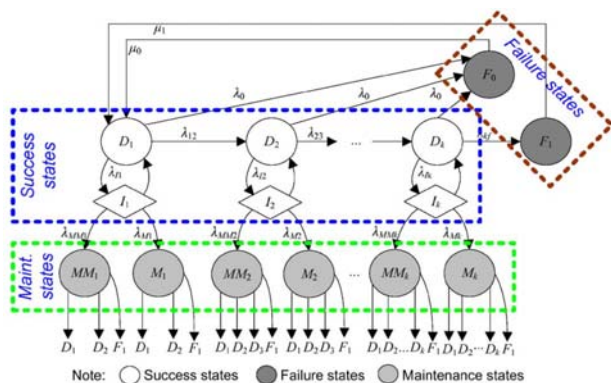
شکل ۱: ماتریس ریسک همراه با مرزبندی بر اساس مقادیر میانگین و انحراف از معیار [۱۴].



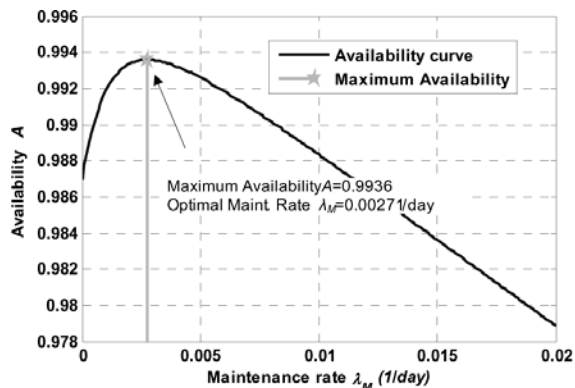
شکل ۲: ماتریس ریسک همراه با استراتژی نت [۱۵].

۴. روش‌های تحلیلی

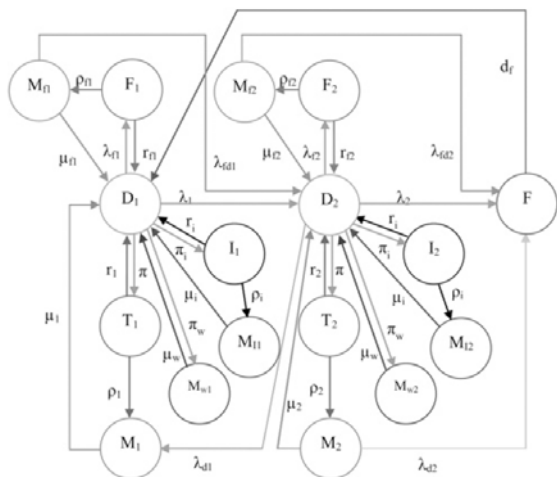
روش‌های تحلیلی عموماً مبتنی بر مدل‌سازی و استخراج روابط حاکم بر نرخ خرابی و عمر بوده و پارامترهای آن می‌تواند متأثر از شرایط و اهمیت تجهیز باشد. مراجع [۲۱]-[۳۶] با این رویکرد به تحلیل و برنامه‌ریزی نت پرداخته‌اند. از جمله روش‌های تحلیلی می‌توان به روش‌های مبتنی بر مدل‌های احتمالاتی مانند مدل مارکوف اشاره نمود. در این مدل‌ها از سوابق تجهیزات در برآورد رفتار احتمالی آنها استفاده می‌شود. سپس بر مبنای مدل استخراج شده، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای قابل اعمال در برنامه نت آینده می‌گردد. طبیعتاً دقت اینگونه روش‌ها متأثر از تعداد نمونه‌های آماری، نامعینی‌ها و دقت در مدل‌سازی است.



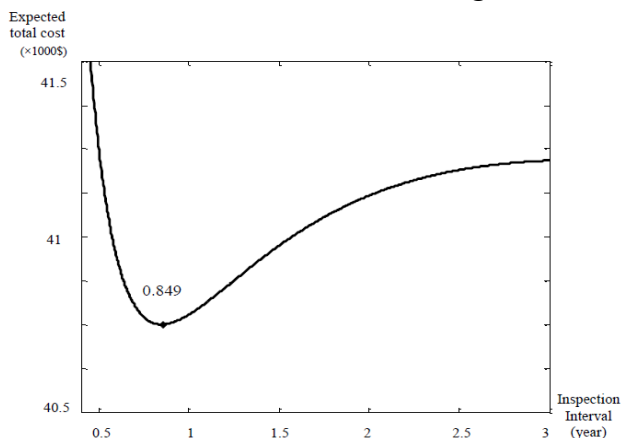
شکل ۵: مدل مارکوف ارائه شده در [۳۲] برای نت تجهیز.



شکل ۳: نرخ بهینه بازرسی برای داشتن حداکثر موجودیت [۳۱].



شکل ۶: مدل مارکوف ارائه شده در [۲۱] برای نت ترانس.



شکل ۴: دوره زمانی بهینه بازرسی برای داشتن حداقل هزینه کل [۳۶].

- مرحله اول: ابتدا اهمیت تجهیزات با ضرایب وزندهی در یک جدول تصمیم‌گیری کمی‌سازی می‌شود. سپس متناسب با آن برای هر تجهیز برنامه نت مناسب تعیین می‌گردد.
- مرحله دوم: برنامه نت جاری با دیاگرام حالت مارکوف مدلسازی می‌شود. برای این منظور از اطلاعات گذشته خرابی تجهیز و عملکرد نت استفاده می‌گردد. سپس همگامی یا همایی^{۱۱} میان اندیس‌های عملکرد گذشته و مدل ساخته‌شده با بهینه‌سازی نرخ انتقال حالت‌ها اعتبارسنجی می‌شود. نهایتاً آنالیز حساسیت برای تعیین نرخ‌های انتقال مؤثر انجام می‌شود.
- مرحله سوم: اندیس‌های قابلیت اطمینان و مجموع هزینه نت و خرابی (وقفه) یک ترانسفورماتور برای روال نت موجود محاسبه می‌شود. نرخ‌های پیشنهادی نت که مزایا و منافع فنی و اقتصادی را در پی دارند، تعیین می‌گردند. نهایتاً اندیس‌های قابلیت اطمینان و

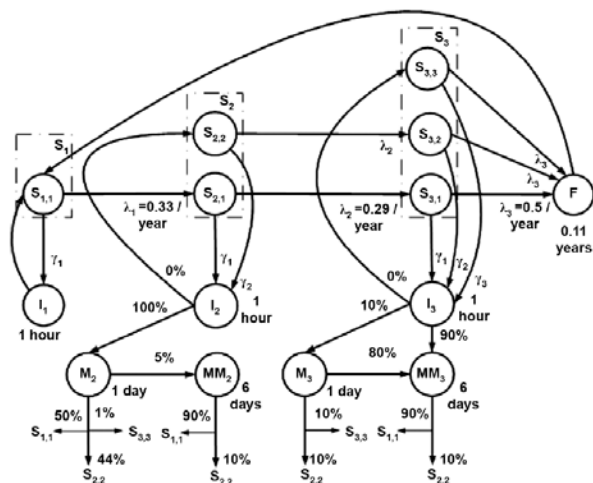
می‌دهد. در [۳۱] نیز با استفاده از مدل مارکوف فازی، اثرات نامعینی نرخ‌های انتقال بررسی شده است.

در مدل پیشنهادی [۳۰] فرض شده است که نرخ خرابی توزیع نمایی دارد و نرخ نت جزئی و عمده یکسان است. در این مدل، سه سطح فرسودگی در نظر گرفته شده است. همچنین ابتدا با نرخ معینی بازرسی انجام شده و در صورت نیاز، به حالت نت جزئی یا عمده منتقل می‌شود. پس از هر عملیات نت این امکان وجود دارد که تجهیز به حالت فرسودگی بهتر یا بدتر منتقل شود یا در حالت قبلی باقی بماند. در حالت فرسودگی اول، وضعیت بهتری متصور نیست. برای نت متناظر با حالت فرسودگی آخر علاوه بر انتقال به حالت‌های قبلی و فعلی، امکان انتقال به حالت خرابی ناشی از فرسودگی نیز وجود دارد.

مرجع [۲۱] در قالب RCAM^{۱۱} به بهینه‌سازی نت ترانسفورماتورهای قدرت می‌پردازد. روش ارائه شده در [۲۱] متشکل از سه مرحله است:

^{۱۲} . Concordance

^{۱۱} . Reliability centered asset management



شکل ۷: مدل پیشنهادی در [۳۵] برای بریکر هوایی.

مجموع هزینه‌ها و طول عمر برای نرخ‌های پیشنهادی نت محاسبه شده و برای نشان‌دادن اعتبار و مزیت‌های استراتژی پیشنهادی، نتایج آن با نتایج مربوط به نرخ‌های فعلی مقایسه می‌شود.

اما این نوع مدل‌ها دارای اشکالاتی می‌باشند که در ادامه ذکر می‌شود:

- عدم تعریف و تفکیک انواع فرسودگی میان مدت و کوتاه مدت.
- عدم مدل‌سازی کامل اثر پیشگیرانه نت با داشتن نرخ‌های ثابت انتقال و همچنین رابطه خطی میان نرخ نت و بازرسی.
- عدم مدل‌سازی دقیق نت ناقص^{۱۳} (داشتن نرخ بازگشتی بدون واسطه) که عملاً در مدل اثری غیر از کاهش احتمال حضور در آن حالت فرسودگی که معادل با خاموشی تجهیز می‌باشد، ندارد.

۵.۲. تعیین وضعیت‌های فرسودگی از طریق بازرسی

در این نوع مدل‌سازی ([۲۹]، [۳۵])، یک روند فرسودگی مدل می‌شود. به این صورت که مانند روش قبل، روند فرسودگی را به بخش‌های مختلف تقسیم نموده و عکس مدت زمان حضور در هر وضعیت تا انتقال به وضعیت دیگر به عنوان نرخ انتقال میان آنها تعریف می‌گردد. طبیعتاً هر وضعیت فرسودگی باید مشخصه‌هایی را برای مشاهده‌پذیری و تشخیص داشته باشد. در این مدل‌ها برخلاف مدل‌های قبلی که وجود سیستم مانیتورینگ مستقل از بازرسی برای تشخیص شرایط فرسودگی تجهیز الزامی است، تشخیص شرایط فرسودگی صرفاً از طریق بازرسی انجام می‌شود. این نوع فرسودگی از نوع برگشت‌پذیر و میان‌مدت/بلندمدت است. یک نمونه مدل مارکوف برای برنامه نت بریکر هوایی که در [۳۵] ارائه شده است، در شکل ۷ نشان داده شده است.

در این مدل‌ها، تمام نرخ‌های انتقال بازرسی یکسان نیستند. همچنین ۱۰۰ درصد بازرسی‌ها منجر به نت عمده و جزئی می‌شود؛ بنابراین این نوع مدل دچار تناقضی میان TBM و CBM شده است.

این مدل دارای اشکالاتی است که در ادامه به آن اشاره می‌شود:

- عدم مدل‌سازی کامل اثر پیشگیرانه نت با وجود نرخ انتقال ثابت.
- عدم ارائه مکانیزم عملی برای محاسبه نرخ‌های فرسودگی.
- عدم تفکیک روندهای فرسودگی مختلف از نظر نوع قابلیت تشخیص، پیش‌بینی و پیشگیری و از نظر ماهیت (علت خرابی) و همچنین کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت بودن.

¹³ . Imperfect maintenance

- عدم تعریف و تفکیک خرابی تصادفی و غیرقابل پیشگیری.

- تعریف نرخ‌های نت عمده و جزئی به صورت درصدی از نرخ تست و بازرسی که منجر به دو اشکال می‌شود:

۱- تغییر غیرواقعی نرخ نت متناسب با تغییر نرخ بازرسی (بصورت خطی): این در حالی است که ظرفیت فرسودگی برای یک تجهیز باید تقریباً ثابت در نظر گرفته شود و در حالت CBM، نرخ نت پیشگیرانه باید وابسته به این ظرفیت باشد. بنابراین با محدودیت تغییرات روبرو است.

۲- زیرسؤال رفتن عملیات تست و بازرسی: به این علت که وابستگی خطی نرخ نت عمده و جزئی به نرخ بازرسی سبب تبدیل شدن ماهیت مدل به TBM (متأثر از ماهیت TBM بازرسی) می‌شود.

۵.۳. تعیین وضعیت فرسودگی احتیاج به نت

این نوع مدل برخلاف مدل‌های پیشین که از وضعیت‌های فرسودگی عمر استفاده می‌کردند، از وضعیت‌های احتیاج به نت بهره برده است و اثر فرسودگی طول عمر را با تغییر نرخ‌های انتقال در بازه‌های تصمیم‌گیری مختلف اعمال نموده است. شکل ۸ مدل ارائه شده در [۳۶] را نشان می‌دهد. مرجع [۳۶] مدعی است که می‌توان با تکرار بهینه‌سازی نت در فاصله‌های زمانی چند ساله (دوره‌های تصمیم‌گیری) با نرخ‌های انتقال (خرابی) جدید، روند فرسودگی عمر را نیز مدل نمود؛ پس نیازی به مدل‌سازی این روند توسط حالت‌های فرسودگی مختلف نمی‌باشد.

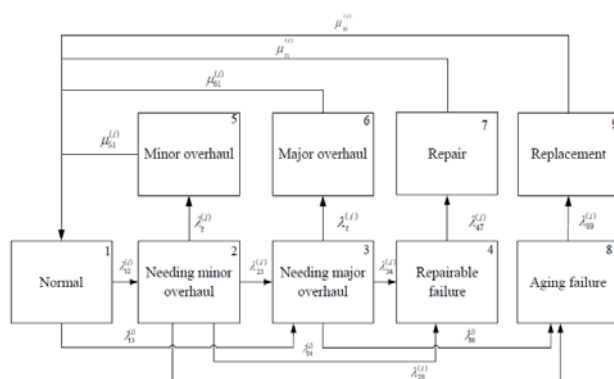
به‌صورت جداگانه با پارامترهای یک گروه خاص و با استفاده از توزیع ویبول^{۱۵} بر حسب عمر هر تجهیز محاسبه می‌شوند.

از طرفی این مدل دارای اشکالاتی است که در ادامه بیان می‌شوند:

- این مدل TBM را شامل نمی‌شود.
- خرابی تصادفی یا غیر قابل تشخیص مدل نشده است.
- این مدل تنها برای حالت بازرسی بدون خاموشی قابل تعریف است. در غیر این‌صورت نرخ تست و بازرسی باید از تمام وضعیت‌های روشن از جمله وضعیت نرمال تعریف شود و خروجی آن تعیین‌کننده وضعیت‌های احتیاج به نت خواهد بود.
- در مدل پیشنهادی [۳۶] نرخ انتقال از وضعیت‌های ۲ به ۳ و از ۳ به ۴ برای خرابی‌های تشخیص داده نشده، غیر قابل تعریف است (چون غیر قابل محاسبه است) و در نرخ‌های انتقال مستقیم از وضعیت نرمال و توجه نشده‌ها به ۴ و ۶ ظاهر می‌شوند.
- نرخ انتقال از وضعیت احتیاج به نت به وضعیت انجام نت به‌درستی بیان نشده است. در [۳۶] عنوان شده است که حالت‌های ۲ و ۳، حالت‌های شناسایی نشده هستند. همچنین حالت ۲، حالت توجه نشده را هم شامل می‌شود. نرخ‌های انتقال بر اساس داده‌های ثبت شده از بازرسی است. بنابراین نرخ‌های این دو حالت بطور مستقیم قابل محاسبه نیستند.
- می‌توان از حالت ۱ به حالت‌های ۴ و ۸ بصورت مستقیم نرخ انتقال تعریف نمود زیرا ممکن است قبل از تشخیص لزوم تعویض یا تعمیر، خرابی رخ دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌های بهینه‌سازی دوره زمانی نت تجهیزات سیستم قدرت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این میان در قالب سه دسته کلی، روش‌های مبتنی بر تصمیم‌سازی، روش‌های مبتنی بر ماتریس ریسک و روش‌های تحلیلی به‌ویژه روش‌های مبتنی بر مدل مارکوف مرور شده و روش‌های مدل‌سازی نت با استفاده از مدل مارکوف با جزئیات بیشتری شرح داده شد و نکات و اشکالات آنها بیان گردید. این روش‌ها به دلیل سادگی و همچنین اعتبار نتایجشان پیشنهاد شده و در تخمین اولیه نرخ بهینه چه از منظر قابلیت اطمینان و چه از منظر اقتصادی توصیه می‌شوند.



شکل ۸: مدل ارائه شده در [۳۶] برای نت تجهیزات فشار قوی.

مقاله [۳۶] به بهینه‌سازی دوره زمانی بازرسی از منظر اقتصادی و به صورت ناحیه‌ای پرداخته است. مجموع هزینه‌های در نظر گرفته شده شامل هزینه‌های نت، تعمیر، تعویض، خروج تجهیز و هزینه‌های گشت‌زنی^{۱۴} است. دوره زمانی بهینه بازرسی برای یک ناحیه، یکسان در نظر گرفته شده و یک مجموعه از تجهیزات شامل بریکر و ترانسفورماتور را برای نواحی مختلف مورد مطالعه قرار می‌دهد. به عبارت دیگر در این روش می‌توان انواع تجهیزات یک ناحیه را در یک برنامه بهینه‌سازی واحد در نظر گرفت.

برخی نکات مطروحه در [۳۶] در ادامه بیان می‌شوند:

- این مقاله نشان می‌دهد که دوره زمانی بهینه بازرسی نواحی مختلف به علت تفاوت در میانگین سنی تجهیزات و متأثر از نرخ خرابی ناشی از فرسودگی عمر آنها، متفاوت است.
- در صورت عدم تشخیص به موقع یا خطای انسانی و... حالت تجهیز به وضعیت احتیاج به اورهال عمده منتقل می‌شود و در صورت عدم تشخیص به موقع و... به حالت خرابی منتقل می‌شود.
- نرخ‌های انتقال به حالت‌های ۲، ۳ و ۴ در مدل ارائه شده در [۳۶] از داده‌های ثبت شده برای یک نوع از تجهیز بدست می‌آیند.
- نرخ انتقال از حالت‌های ۴ به ۷ و از ۸ به ۹ برابر است با عکس مدت زمان وقوع خرابی تا انجام تعمیرات یا تعویض.
- نرخ‌های بازگشت، عکس میانگین زمان انجام PM، CM یا تعویض می‌باشند.
- نرخ‌های انتقال از ۲ و ۳ به ۸ یا همان خرابی ناشی از فرسودگی عمر، یکسان می‌باشند؛ زیرا علت یکسانی دارند و برای هر تجهیز

¹⁵. Weibull

¹⁴. Patrol cost

منابع

- health and risk model," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.
- [19] R. Phadungthin and J. Haema, "Development of risk optimization model for high voltage substation transformer maintenance," in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2015, pp. 1–5.
- [20] J. Chitpong, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, "Evaluation criteria for condition and importance assessment of high voltage transmission line," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1–6.
- [21] A. Koksai and A. Ozdemir, "Improved transformer maintenance plan for reliability centred asset management of power transmission system," *Transm. Distrib. IET Gener.*, vol. 10, no. 8, pp. 1976–1983, 2016.
- [22] C. L. Melchor-Hernández, F. Rivas-Dávalos, S. Maximov, V. H. Coria, and J. L. Guardado, "A model for optimizing maintenance policy for power equipment," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 68, pp. 304–312, Jun. 2015.
- [23] V. H. Coria, S. Maximov, F. Rivas-Dávalos, C. L. Melchor, and J. L. Guardado, "Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 135, pp. 55–63, Mar. 2015.
- [24] X. Zhang, J. Zhang, and E. Gockenbach, "Reliability Centered Asset Management for Medium-Voltage Deteriorating Electrical Equipment Based on Germany Failure Statistics," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 721–728, May 2009.
- [25] L. Bertling, R. Allan, and R. Eriksson, "A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 75–82, Feb. 2005.
- [26] N. Sudket and S. Chaitusaney, "Optimization of substation equipment maintenance by considering equipment deterioration," in *2014 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 2014, pp. 1–4.
- [27] M. L. Yin, J. E. Angus, and K. S. Trivedi, "Optimal Preventive Maintenance Rate for Best Availability With Hypo-Exponential Failure Distribution," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 62, no. 2, pp. 351–361, Jun. 2013.
- [28] N. Moslemi, M. Kazemi, S. M. Abedi, H. Khatibzadeh-Azad, and M. Jafarian, "Mode-based reliability centered maintenance in transmission system," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, p. n/a–n/a, Jan. 2016.
- [29] N. Moslemi, M. Kazemi, S. M. Abedi, H. Khatibzadeh-Azad, and M. Jafarian, "Maintenance Scheduling of Transmission Systems Considering Coordinated Outages," *IEEE Syst. J.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2017.
- [30] H. Ge, C. L. Tomasevicz, and S. Asgarpour, "Optimum Maintenance Policy with Inspection by Semi-Markov Decision Processes," in *2007 39th North American Power Symposium*, 2007, pp. 541–546.
- [31] H. Ge and S. Asgarpour, "Reliability Evaluation of Equipment and Substations With Fuzzy Markov Processes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1319–1328, Aug. 2010.
- [32] H. Ge and S. Asgarpour, "Reliability and Maintainability Improvement of Substations With Aging Infrastructure," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp. 1868–1876, Oct. 2012.
- [33] S. K. Abeygunawardane and P. Jirutitjaroen, "New State Diagrams for Probabilistic Maintenance Models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2207–2213, Nov. 2011.
- [34] S. K. Abeygunawardane, P. Jirutitjaroen, and H. Xu, "Adaptive Maintenance Policies for Aging Devices Using a Markov Decision Process," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3194–3203, Aug. 2013.
- [35] S. K. Abeygunawardane and P. Jirutitjaroen, "Application of Probabilistic Maintenance Models for Selecting Optimal Inspection Rates Considering Reliability and Cost Tradeoff," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 1, pp. 178–186, Feb. 2014.
- [36] J. Zhong, W. Li, C. Wang, J. Yu, and R. Xu, "Determining Optimal Inspection Intervals in Maintenance Considering Equipment Aging Failures," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1474–1482, Mar. 2017.
- [1] N. Bloom, *Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple*. McGraw-Hill, 2006.
- [2] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A Comprehensive Scheme for Reliability Centered Maintenance in Power Distribution Systems #x2014;Part I: Methodology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 761–770, Apr. 2013.
- [3] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A Comprehensive Scheme for Reliability-Centered Maintenance in Power Distribution Systems #x2014;Part II: Numerical Analysis," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 771–778, Apr. 2013.
- [4] H. Wang, D. Lin, J. Qiu, L. Ao, Z. Du, and B. He, "Research on Multiobjective Group Decision-Making in Condition-Based Maintenance for Transmission and Transformation Equipment Based on D-S Evidence Theory," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1035–1045, Mar. 2015.
- [5] I. Martón, P. Martorell, R. Mullor, A. I. Sánchez, and S. Martorell, "Optimization of test and maintenance of ageing components consisting of multiple items and addressing effectiveness," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 153, pp. 151–158, Sep. 2016.
- [6] K. T. Huynh, A. Grall, and C. Bérenguer, "Assessment of diagnostic and prognostic condition indices for efficient and robust maintenance decision-making of systems subject to stress corrosion cracking," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 159, pp. 237–254, Mar. 2017.
- [7] Z. Cai, Y. Li, S. Zhang, and W. Zhou, "Maintenance decision making model with multiple attribute optimization," *J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 499–503, Aug. 2016.
- [8] M. Awad and R. A. As'ad, "Reliability centered maintenance actions prioritization using fuzzy inference systems," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 433–452, Sep. 2016.
- [9] J. H. Heo, M. K. Kim, G. P. Park, Y. T. Yoon, J. K. Park, S. S. Lee, and D. H. Kim, "A Reliability-Centered Approach to an Optimal Maintenance Strategy in Transmission Systems Using a Genetic Algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2171–2179, Oct. 2011.
- [10] J. H. Heo, M. K. Kim, and J. K. Lyu, "Implementation of Reliability-Centered Maintenance for transmission components using Particle Swarm Optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 238–245, Feb. 2014.
- [11] J.-H. Heo, J.-K. Lyu, M.-K. Kim, and J.-K. Park, "Application of Particle Swarm Optimization to the Reliability Centered Maintenance Method for Transmission Systems," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 814–823, 2012.
- [12] M. Hosseini Firouz and N. Ghadimi, "Optimal preventive maintenance policy for electric power distribution systems based on the fuzzy AHP methods," *Complexity*, vol. 21, no. 6, pp. 70–88, Jul. 2016.
- [13] D. Piasson, A. A. P. Biscoaro, 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," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 137, pp. 41–50, Aug. 2016.
- [14] M. Abbasghorbani, H. R. Mashhadi, and Y. Damchi, "Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks," *Transm. Distrib. IET Gener.*, vol. 8, no. 9, pp. 1583–1590, Sep. 2014.
- [15] T. Y. Suwanasri, C. Suwanasri, and R. Phadungthin, "Risk assessment based on condition and importance criteria for power transformer in Thailand transmission network," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 18–27, Jan. 2015.
- [16] R. Phadungthin and J. Haema, "Maintenance management for risk reduction of high voltage transformer," *J. Ind. Technol.*, vol. 11, no. 3, 2015.
- [17] E. A. L. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 36–46, Jan. 2017.
- [18] M. Vermeer, J. Wetzer, P. van der Wielen, E. de Haan, and E. de Meulemeester, "Asset-management decision-support modeling, using a