Archive of SID

انتخاب استراتژی بهینه تعمیراتی یک تجهیز با استفاده از مدل تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی

مرتضی صمدی، حسین سیفی و محمودرضا حقی‌فام

چکیده: تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور، ابزاری برای مدیریت تعمیر و نگهداری دارایی‌های استهلاک‌پذیر است. اساس این روش شناسایی مودهای خرابی دارایی‌ها، فرایند استهلاک آنها و برنامه‌ریزی تعمیرات به منظور کاهش ریسک خرابی و هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری است. یکی از روش‌های تعمیراتی مورد استفاده در تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور، تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی است. در تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی، پس از بازرسی و تعیین وضعیت استهلاک یک تجهیز در مورد نوع تعمیر تصمیم‌گیری می‌شود. در این مقاله، مدلی برای برنامه‌ریزی سالانه تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی تجهیزات شبکه ارائه می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی به صورت یک مدل احتمالی با متغیرهای باینری به عنوان زمان‌های بازرسی فرمول‌بندی می‌شود و استراتژی بهینه تعمیراتی تعیین می‌شود. این مدل روی یک ترانسفورماتور، پیاده‌سازی و آنالیز حساسیت به منظور بررسی اثر هزینه بازرسی و هزینه خاموشی انجام می‌شود.

کلیدواژه: **مدیریت دارایی، تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور، بازرسی، استراتژی تعمیراتی.**

۱- مقدمه

با افزایش تعداد تجهیزات فرسوده در شبکه‌های قدرت و محدودیت منابع، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تجهیزات به منظور کاهش احتمال خرابی و ریسک خرابی به عنوان یکی از ابزارهای مدیریت دارایی مورد تأکید و استفاده بهره‌برداران در شرکت‌های برق قرار گرفته است. تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور، برنامه‌ای جامع و بهینه را برای مدیریت منابع تعمیرات، تعیین مودهای خرابی غالب با آنالیز مود و اثر خرابی، زمان و استراتژی تعمیر هر مود خرابی مشخص می‌کند [۱].

مطالعات تعمیر و نگهداری به دو دسته تجهیزمحور و سیستم‌محور تقسیم‌بندی می‌شوند. در تعمیر و نگهداری تجهیزمحور، سیاست بهینه تعمیر و نگهداری تجهیز با هدف افزایش قابلیت اطمینان تجهیز در بازه زمانی بهره‌برداری بدون در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری تعیین می‌شود [۲] تا [۱۳]. در مطالعات سیستم‌محور با استفاده از تابع توزیع احتمال خرابی تجهیز، زمان‌بندی تعمیر و نگهداری تجهیزات سیستم با هدف کمینه‌کردن هزینه تعمیر و نگهداری در طول سال و در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری بهینه‌سازی می‌شود [۱۴] تا [۲۸]. این مطالعات در دو شبکه توزیع و انتقال انجام شده است. عواقب و مدت زمان خروج یک تجهیز ناشی از خرابی و تعمیر و نگهداری در دو شبکه توزیع و انتقال متفاوت است.

به طور کلی روش‌های تعمیر و نگهداری در سطح تجهیز به سه دسته کلی بدون تعمیر، زمان‌محور و شرایط‌محور تقسیم می‌شوند. در روش بدون تعمیر تا زمانی که تجهیز خراب نشود هیچ گونه تعمیری روی آن انجام نمی‌شود. در تعمیرات زمان‌محور، هر تجهیز مستقل از وضعیت خرابی آن در فواصل زمانی مشخص تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در تعمیرات شرایط‌محور، با توجه به پایش و بازرسی تجهیزات شبکه و وضعیت استهلاک تجهیز، نوع تعمیر تعیین می‌شود [۲]. روش‌های تعمیر و نگهداری سطح تجهیز را می‌توان به صورت دیاگرام‌های حالت نمایش داد و بر اساس فرایندهای مارکوف و شبه‌مارکوف مدل‌سازی کرد تا اثر تعمیر و نگهداری را بر قابلیت اطمینان تجهیز به صورت کمی تعیین شود و هزینه تعمیر، نگهداری و خرابی را به دست آورد. به منظور بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری باید بین هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه خروج ناشی از تعمیر یا خرابی تجهیز تعادل برقرار شود. در این راستا در مدل‌های مارکوف مبتنی بر دیاگرام حالت، نرخ تعمیر و نگهداری به گونه‌ای تعیین می‌شود که هزینه کلی شامل هزینه خرابی، بازرسی، تعمیرات و تعویض در طول عمر مفید تجهیز کمینه شود [۳].

خروجی مدل‌های مارکوف مبتنی بر دیاگرام حالت در تعمیرات زمان‌محور، نرخ تعمیر و در تعمیرات شرایط‌محور، نرخ بازرسی است که این نرخ به صورت متناوب یا غیر متناوب می‌تواند تعیین شود. در تعمیر و نگهداری متناوب، تعمیرات فارغ از وضعیت استهلاک تجهیز در فواصل زمانی یکسان و ثابت انجام می‌گردد. در تعمیر و نگهداری غیر متناوب، زمان تعمیر و نگهداری بسته به وضعیت استهلاک تجهیز تعیین می‌شود و هرچه تجهیز فرسوده‌تر گردد، نرخ تعمیر و نگهداری افزایش می‌یابد تا تجهیز در فواصل زمانی کمتر تعمیر و نگهداری شود. در [۴] مدلی برای بررسی اثر تغییر نرخ بازرسی در هر حالت از فرایند استهلاک بر زمان متوسط تا اولین خرابی (MTTF) و هزینه خرابی، تعمیر و بازرسی ترانسفورماتور ارائه شده است. در [۵] سیاست بهینه تعمیراتی یک تجهیز با در نظر گرفتن خرابی تصادفی و خرابی ناشی از استهلاک تجهیز با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف تعیین می‌شود. سیاست وفقی تعمیرات با در نظر گرفتن تأخیر در انجام تعمیر با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در [۶] و نرخ بهینه تعمیر و نگهداری تجهیزات پست به منظور بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان پست در [۷] ارائه شده است.

در مدل‌های تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی، زمان بازرسی با استفاده از دانش ما از استهلاک تجهیز تعیین می‌شود که در شرایط واقعی این دانش تنها پس از بازرسی یا تعمیر تجهیز به دست می‌آید. در [۸] روشی برای مدل‌سازی نرخ خرابی قطعات با استفاده از داده‌های بازرسی ارائه شده است. در [۹] نشان داده می‌شود که دیاگرام کلاسیک مارکوف

این مقاله در تاریخ ۱۷ مهر ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۹ آبان ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

مرتضی صمدی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: morteza.samadi@modares.ac.ir).

حسین سیفی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

محمودرضا حقی‌فام، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: haghifam@modares.ac.ir).

www.SID.ir

Archive of SID

برای بازرسی غیر متناوب، نتیجه درستی مطابق با شرایط واقعی تعمیرات به دست نمی‌دهد و بر این اساس در [۱۰] دیاگرام حالتی برای مدل‌سازی تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی غیر متناوب پیشنهاد می‌شود تا شرایط واقعی تعمیر و نگهداری را در خود لحاظ کند. فرض اصلی در مدل ارائه‌شده این است تا زمانی که داده‌های بازرسی و پایش وضعیت را نداشته باشیم، نمی‌توان در مورد تعمیر کلی یا جزئی و زمان بعدی بازرسی تصمیم‌گیری کرد. در این مدل نرخ بازرسی به وضعیت استهلاک تجهیز وابسته بوده و با بدترشدن وضعیت استهلاک، نرخ بازرسی افزایش می‌یابد تا از وقوع خرابی جلوگیری شود. در واقع نرخ بازرسی در این مدل غیر متناوب است و زمان بازرسی بعدی همیشه پس از بازرسی یا تعمیر تعیین می‌شود. از این مدل برای تعیین سیاست بهینه تعمیر و نگهداری یک تجهیز [۱۱]، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر مودهای خرابی [۱۲] و هم‌زمان‌سازی تعمیرات تجهیزات مختلف در یک بی انتقال [۱۳] استفاده می‌شود.

برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری در شبکه توزیع [۱۴] تا [۲۱] و انتقال [۲۲] تا [۲۸] از مدل تعمیر و نگهداری سطح تجهیز استفاده می‌شود. تعمیر و نگهداری تجهیزات در سطح سیستم باید به گونه‌ای انجام شود که اولاً احتمال خرابی تجهیز را کاهش و عمر مفید آن را افزایش دهد و ثانیاً منجر به کمترین خسارت ناشی از خرابی همچون خاموشی یا هزینه تغییر آرایش در شبکه شود. تعداد تجهیزات، گستردگی جغرافیایی و شرایط آب و هوایی، فرکانس خرابی و عواقب خرابی تجهیزات در شرکت‌های انتقال و توزیع متفاوت است. در [۱۴] و [۱۵] روشی برای انتخاب قطعات بحرانی از دید قابلیت اطمینان سیستم و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور تمام تجهیزات در شبکه توزیع ارائه شده است. در [۱۶] از مدل مبتنی بر بازرسی برای تعیین نرخ بازرسی فیدرهای شبکه توزیع استفاده گردیده است. نرخ خرابی متغیر با زمان بلندمدت در این مدل به وسیله چند مدل مارکوف چهارحالته تعمیر و نگهداری در سال‌های متوالی مدل‌سازی شده و هزینه کلی شامل هزینه تعمیر و بازرسی، خاموشی و قطع فیدرها مینیمم گردیده است. روشی سیستماتیک برای کمی‌سازی اثر استراتژی‌های مختلف تعمیراتی کابل‌های شبکه توزیع بر روی قابلیت اطمینان و هزینه شبکه در [۱۷] ارائه شده است.

روشی مبتنی بر مدیریت ریسک تعمیرات بلندمدت خطوط شبکه توزیع که احتمال و عواقب خرابی خطوط را در نظر می‌گیرد در [۱۸] و [۱۹] تشریح شده است. در این مدل‌سازی، ریسک فاکتورهای تفکیک‌شده برای خطوط توزیع شناسایی شده و با استفاده از دیاگرام درخت تصمیم‌گیری، عملیات پیشگیرانه تعمیر و نگهداری برای بازه چندین ساله انتخاب می‌گردد و نشان داده می‌شود که هزینه متوسط تعمیرات نسبت به تعمیرات زمان‌محور در بلندمدت کاهش می‌یابد. در [۲۰] روشی برای مدیریت دارایی ترانسفورماتورها در شبکه توزیع با محاسبه شاخص بحران ارائه شده است. استراتژی منطقه‌محور برای بازرسی ترانسفورماتورها و برکرهای شبکه توزیع در [۲۱] معرفی شده و از مدل مبتنی بر بازرسی برای ترکیب خرابی‌های ناشی از پیری تجهیز و خرابی‌های قابل تعمیر استفاده می‌شود تا نرخ بازرسی بهینه تجهیزات را در هر منطقه به دست آورد.

برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تجهیزات در شبکه انتقال به منظور مدیریت منابع تعمیرات با قیود مختلف با هدف کاهش ریسک تجمعی در طول سال در [۲۲] ارائه شده است. کاهش ریسک تجمعی با محاسبه عواقب خرابی سیستم در طول زمان به دست می‌آید و فعالیت‌های مختلف تعمیرات در طول سال برای تجهیزات مختلف مشخص می‌شود. در [۲۳] شاخص عملکرد سیستم برای انتخاب بین تعمیر یا تعویض تجهیزات فشارقوی در سیستم معرفی می‌شود که هزینه خاموشی، هزینه انرژی تحویل‌نشده و اثرات محیط زیستی را برای مدیریت ریسک تعمیرات در نظر می‌گیرد. از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک در [۲۴] برای تعیین استراتژی بهینه تعمیرات در بازه زمانی بلندمدت خطوط انتقال استفاده شده و پارامترهایی برای شناسایی وضعیت استهلاک خط، برج و مقره معرفی گردیده است. در [۲۵] و [۲۶] روشی دومرحله‌ای برای مدیریت تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورها در شبکه انتقال در بازه زمانی میان‌مدت و کوتاه‌مدت ارائه شده که از تابع توزیع ویبال برای تخمین نرخ خرابی متغیر با زمان ترانسفورماتورها استفاده می‌کند. مدیریت تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور برکرها در شبکه انتقال در [۲۷] و [۲۸] بحث و بررسی شده است.

در [۱۰] مدل مارکوف تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی با فرض اطلاع اپراتور از وضعیت استهلاک تجهیز پس از بازرسی ارائه شده است. فرض اصلی در مدل ارائه‌شده این است تا زمانی که داده‌های بازرسی و پایش وضعیت را نداشته باشیم، نمی‌توان در مورد تعمیر کلی یا جزئی و زمان بعدی بازرسی تصمیم‌گیری کرد. در این مدل نرخ بازرسی به وضعیت استهلاک وابسته بوده و با بدترشدن وضعیت استهلاک تجهیز، نرخ بازرسی افزایش می‌یابد تا از وقوع خرابی جلوگیری شود. در واقع نرخ بازرسی در این مدل غیر متناوب است و زمان بازرسی بعدی همیشه پس از بازرسی یا تعمیر تعیین می‌شود و برنامه تعمیرات در ابتدای افق برنامه‌ریزی تعیین نمی‌شود. در این مقاله، مدلی برای برنامه‌ریزی تصادفی تعمیرات مبتنی بر بازرسی مودهای خرابی تجهیزات شبکه انتقال معرفی می‌شود تا عدم قطعیت مرتبط با نتیجه بازرسی در هر وضعیت استهلاک تجهیز را پوشش دهد. بدین منظور تابع توزیع احتمالاتی فرایند استهلاک مود خرابی، قبل و بعد از بازرسی با معرفی ماتریس استراتژی تعمیراتی تعیین می‌شود. در این مدل، استراتژی تعمیراتی هر مود خرابی شامل زمان بازرسی، نوع و مدت زمان تعمیر در هر وضعیت استهلاک مشخص می‌گردد و برنامه زمان‌بندی بازرسی و تعمیرات در ابتدای افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شود. با معرفی استراتژی‌های مختلف تعمیراتی، استراتژی بهینه تعمیراتی برای یک مود خرابی با مقایسه هزینه کلی تعمیرات مشخص می‌شود.

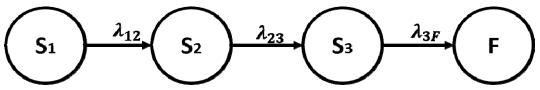
در بخش ۲ تابع توزیع زمانی فرایند استهلاک قبل و بعد از بازرسی و تعمیرات با استفاده از فرایند مارکوف مدل‌سازی می‌شود. در بخش ۳ برنامه تعمیر و نگهداری به صورت یک مدل ریاضی به منظور کمینه‌کردن هزینه کلی تعمیرات با متغیرهای باینری به عنوان زمان‌های بازرسی در طول سال تعریف می‌شود. در بخش ۴ نتایج عددی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری برای ترانسفورماتور ارائه و نتایج عددی بحث و بررسی می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۵ آمده است.

۲- مدل‌سازی فرایند استهلاک

برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری در طول سال، باید اثر تعمیر و نگهداری بر احتمال و نرخ خرابی به صورت کمی مشخص شود. بدین منظور ابتدا باید تابع توزیع فرایند استهلاک و چگونگی تغییر نرخ خرابی در طول زمان را به دست آوریم. نرخ و احتمال خرابی یک مود خرابی تجهیز در گذر زمان به صورت تدریجی افزایش می‌یابد تا فرایند استهلاک به حالت خرابی ختم شود. تابع توزیع احتمال خرابی با استفاده از داده‌های

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: فرایند استهلاک ۴حالته.

خرابی، تعمیر و نگهداری و تجربه گروه تعمیراتی برآورد می‌شود. پس از برآورد تابع توزیع احتمال زمان خرابی، نرخ خرابی استخراج می‌گردد.

۲-۱ تابع توزیع احتمال فرایند استهلاک

فرایند تدریجی استهلاک را می‌توان به چندین حالت متمایز تفکیک کرد به گونه‌ای که نرخ انتقال بین این حالت‌ها ثابت باشد. در تئوری می‌توان n مرحله استهلاک برای هر تجهیز تعریف کرد اما در عمل این مراحل باید به گونه‌ای تعریف شود که پس از انجام بازرسی و با توجه به تجربه گروه تعمیراتی، مشخص شود که تجهیز در کدام وضعیت استهلاک قرار دارد. با این فرضیات می‌توان نرخ خرابی یک تجهیز را به صورت تکه‌ای‌خطی مدل‌سازی کرد به صورتی که نمایانگر فرایند تدریجی و افزایشی نرخ خرابی در گذر زمان باشد. شکل ۱ فرایند استهلاک ۴حالته یک مود خرابی را نشان می‌دهد.

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل فرایند استهلاک مارکوف، تابع توزیع احتمال حالت‌ها به دست می‌آید. معادلات دیفرانسیل فرایند استهلاک مارکوف به صورت (۱) نوشته می‌شود [۲۹]

$$p_t' = p_t \times A \qquad (۱)$$

که p_t ماتریس توزیع احتمال حالت با ابعاد $۱\times n$، n تعداد حالت‌های استهلاک مود خرابی و A ماتریس نرخ گذار حالت با ابعاد $n\times n$ است. معادلات دیفرانسیل (۱) با استفاده از (۲) حل می‌شود

$$p_t = p_{.} \times e^{At} \qquad (۲)$$

که $p_{.}$ توزیع احتمال اولیه فرایند است.

۲-۲ معرفی ماتریس استراتژی تعمیراتی برای تعیین اثر بازرسی بر تابع توزیع احتمال فرایند استهلاک

تابع توزیع احتمال فرایند استهلاک تجهیز در طول زمان تغییر می‌کند و در صورت عدم انجام بازرسی و تعمیر مود خرابی، احتمال رسیدن به حالت خرابی افزایش می‌یابد. در این مقاله، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری با فرض عدم قطعیت در نتایج بازرسی در هر گام زمانی فرمول‌بندی می‌شود. بدین منظور اثر بازرسی بر تابع توزیع احتمال هر حالت از فرایند تعمیر و نگهداری در هر گام زمانی به دست می‌آید. تابع توزیع احتمال توسط (۳) محاسبه می‌شود

$$p_{i,t} = (۱ - Xins_{i,t}) \times p_{i,t-۱} \times Q_i + Xins_{i,t} \times p_{i,t-۱} \times Q_i \times MS_i \ , \ \forall i,t \qquad (۳)$$

$$Q_i = e^{A_i \times ts} \ , \ \forall i \qquad (۴)$$

که $Xins_{i,t}$ متغیر باینری بازرسی مود خرابی i در زمان t، ts گام زمانی برنامه‌ریزی، Q_i ماتریس گذار احتمال در بازه زمانی ts و MS_i ماتریس استراتژی تعمیراتی با ابعاد $n\times n$ است.

معادله (۳) از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول، نمایانگر تغییر تابع توزیع احتمال فرایند استهلاک در صورت عدم انجام بازرسی و بخش دوم، نمایانگر تغییر تابع توزیع احتمال فرایند در صورت انجام بازرسی است. درایه‌های ماتریس استراتژی تعمیراتی، تغییر تابع توزیع احتمال هر حالت از فرایند استهلاک را در صورت انجام بازرسی نشان می‌دهد. برای واضح‌کردن موضوع اگر فرض کنیم در یک فرایند ۴حالته، پس از بازرسی، در حالت $s۱$ هیچ گونه تعمیری روی تجهیز انجام نشود و در حالت $s۲$ و $s۳$ تعمیر جزئی و در حالت $s۴$ تعویض انجام شود، ماتریس استراتژی تعمیراتی به صورت زیر نشان داده می‌شود

$$MS_i = \begin{pmatrix} ۱ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۱ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۱ & ۰ & ۰ \\ ۱ & ۰ & ۰ & ۰ \end{pmatrix}$$

درایه (i,j) از این ماتریس، احتمال انتقال به حالت j پس از بازرسی در حالت i است. مثلاً عدد یک در درایه (۳،۲) نمایانگر این است که اگر پس از بازرسی مشخص شد که مود خرابی در حالت $s۳$ فرایند استهلاک قرار دارد، با تعمیر جزئی در حالت $s۳$ به حالت $s۲$ انتقال می‌یابد. تعمیرات ناقص را نیز می‌توان در مدل در نظر گرفت. بدین صورت که هر درایه از هر سطر، احتمال بودن در حالت‌های مختلف پس از تعمیرات ناقص است. معادله (۴) اثر تعمیر و بازرسی بر روی فرایند استهلاک را به صورت کمی تعیین می‌کند.

پس از مدل‌سازی نرخ خرابی و تعمیر و نگهداری، باید استراتژی تعمیراتی شامل نوع و مدت زمان تعمیر در هر حالت از فرایند استهلاک تعیین شود. برای مودهای خرابی معمولاً دو نوع تعمیر جزئی و کلی مطرح می‌شود. وضعیت استهلاک پس از تعمیر جزئی به اندازه یک مرحله و پس از تعمیر کلی به اندازه چند مرحله بهبود می‌یابد. مدت زمان و هزینه انجام تعمیرات کلی از تعمیرات جزئی بیشتر است. این که پس از تعمیرات کلی، مود خرابی وارد کدام حالت استهلاک شود به تجربه گروه تعمیراتی بستگی دارد. معمولاً تعمیر کلی به گونه‌ای انجام می‌شود که مود خرابی وارد حالت اولیه فرایند می‌گردد.

۳- مدل‌سازی هزینه تعمیر و نگهداری

پس از یافتن تابع توزیع احتمال فرایند استهلاک، باید هزینه تعمیر و نگهداری مدل‌سازی گردد تا برنامه تعمیر و نگهداری به صورت بهینه پیاده‌سازی شود. برای بهینه‌سازی باید استراتژی‌های تعمیراتی مختلف برای یک مود خرابی را با همدیگر مقایسه و استراتژی بهینه را انتخاب کنیم. برای این مقایسه باید فاکتورهای اقتصادی مثل هزینه بازرسی، تعمیر جزئی، تعمیر کلی، ریسک خرابی و خاموشی مدل‌سازی شود. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در مدل شرایط‌محور، پس از بازرسی در هر حالت از فرایند استهلاک به جز حالت خرابی، می‌توان سه تصمیم تعمیراتی گرفت: عدم تعمیر، تعمیر جزئی و تعمیر کلی. معمولاً اگر مود خرابی در حالت $s۱$ باشد تعمیری انجام نمی‌شود و روی سایر مراحل استهلاک باید در مورد انجام تعمیرات در برنامه تعمیر و نگهداری تصمیم‌گیری و استراتژی تعمیراتی برای هر مود خرابی تعیین شود.

۳-۱ هزینه بازرسی و تعمیر جزئی و کلی

هزینه مورد انتظار بازرسی از حاصل‌ضرب هزینه انجام بازرسی و مجموع احتمال حالت‌های نیازمند بازرسی به دست می‌آید. برای تشخیص حالت‌های نیازمند بازرسی، بردار متغیر $p_{i,t}$ برای حالت‌های مختلف تفکیک و به صورت $p_{s,i,t}$ نوشته می‌شود. همه حالت‌های فرایند استهلاک به جز خرابی نیازمند بازرسی هستند. معادله (۵) هزینه انجام بازرسی را نشان می‌دهد

$$ECins_{i,t} = insC_i\Big(\sum_{s\in \mathrm{Sin}\,s} p_{s,i,t}\Big) \ , \ \forall i,t \qquad (۵)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که $ECins_{i,t}$ هزینه مورد انتظار بازرسی مود خرابی i در زمان t، $insC_i$ هزینه هر بار بازرسی مود خرابی i، $p_{s,i,t}$ احتمال بودن در حالت استهلاک s مود خرابی i در زمان t و $\mathrm{Sin}\,s$ مجموعه حالت‌های نیازمند بازرسی فرایند تعمیر و نگهداری است.

هزینه مورد انتظار تعمیرات در صورتی حساب می‌شود که ابتدا مود خرابی مورد بازرسی قرار گیرد و حالت استهلاک تجهیز مشخص شود. در صورت عدم انجام بازرسی این هزینه صفر خواهد بود. تمام حالت‌های فرایند تعمیر و نگهداری به غیر از حالت خرابی نیازمند بازرسی هستند. به عبارتی هزینه بازرسی در احتمال همه حالت‌ها به جز احتمال خرابی ضرب می‌شود. در صورت عدم بازرسی، احتمال خرابی در گذر زمان افزایش می‌یابد و منجر به کاهش هزینه بازرسی و افزایش هزینه خاموشی و ریسک خرابی تجهیز می‌شود. هزینه تعمیرات جزئی و کلی به صورت حاصل‌ضرب احتمال حالت‌های نیازمند تعمیر جزئی یا کلی و هزینه انجام تعمیر جزئی و کلی محاسبه می‌شود. معادله (۶) هزینه مورد انتظار تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهد

$$ECmain_{i,t} = \min C_i\left(\sum_{s\in S\min} p_{s,i,t}\right) + majC_i\left(\sum_{s\in Smaj} p_{s,i,t}\right)\ ,\ \forall i,t \qquad (۶)$$

که $ECmain_{i,t}$ هزینه مورد انتظار تعمیرات جزئی و کلی مود خرابی i در زمان t، $\min C_i$ هزینه هر بار تعمیر جزئی مود خرابی i، $majC_i$ هزینه هر بار تعمیر کلی مود خرابی i، $S\min$ مجموعه حالت‌های نیازمند تعمیر جزئی فرایند تعمیر و نگهداری و $Smaj$ مجموعه حالت‌های نیازمند تعمیر کلی فرایند تعمیر و نگهداری است.

حالت‌هایی که نیازمند تعمیر جزئی یا کلی هستند بستگی به استراتژی تعمیراتی مود خرابی دارد. در استراتژی تعمیراتی می‌توان تعمیرات جزئی یا تعمیرات کلی را برای حالت‌های مختلف فرایند استهلاک در نظر گرفت. استراتژی‌های مختلف برای یک مود خرابی باید طراحی شود و استراتژی تعمیراتی مناسب برای یک مود انتخاب گردد. در صورتی که یک مود خرابی را به صورت یک فرایند n مرحله‌ای در نظر بگیریم، تعداد $۳^{n-۲}$ استراتژی مختلف می‌توان برای آن در نظر گرفت. تمام هزینه‌های مربوط به یک استراتژی در طول سال حساب می‌شود و استراتژی با کمترین هزینه به عنوان استراتژی تعمیراتی بهینه یک مود خرابی به دست می‌آید.

۳-۲ هزینه ریسک خرابی

هزینه ریسک خرابی به صورت حاصل‌ضرب هزینه تعویض در احتمال خرابی به دست می‌آید. در صورت عدم انجام بازرسی روی تجهیز، ریسک و هزینه خرابی در طول بازه زمانی برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. معادله (۷) این هزینه را نشان می‌دهد

$$ECrep_{i,t} = repC_i\left(\sum_{s\in F} p_{s,i,t}\right)\ ,\ \forall i,t \qquad (۷)$$

که $ECrep_{i,t}$ هزینه ریسک خرابی مود خرابی i در زمان t، $repC_i$ هزینه هر بار تعویض مود خرابی i و F مجموعه حالت‌های نیازمند تعویض فرایند تعمیر و نگهداری است.

۳-۳ هزینه خاموشی

هزینه مورد انتظار خاموشی به صورت حاصل‌ضرب متوسط مدت زمان خاموشی و هزینه هر ساعت خاموشی به دست می‌آید. اگر تجهیز در شبکه انتقال باشد، به علت بهره‌برداری با قید $N-۱$، تعمیر و نگهداری تجهیز منجر به خاموشی در شبکه نمی‌شود و فقط هزینه بهره‌برداری از شبکه تغییر می‌کند اما در صورتی که تجهیز در شبکه توزیع باشد، خروج تجهیز می‌تواند باعث ایجاد خاموشی در شبکه شود که در هنگام بازرسی، تعمیر جزئی، تعمیر کلی و تعویض اتفاق می‌افتد. در هر صورت هزینه هر ساعت خاموشی در شبکه انتقال را می‌توان به صورت هزینه ساعتی تغییر آرایش شبکه و هزینه خاموشی در شبکه توزیع را به صورت هزینه ساعت از دست رفتن بار مدل‌سازی کرد. در این مقاله فرض می‌شود که تعمیر و نگهداری تجهیز منجر به خاموشی در شبکه می‌گردد و هزینه ساعتی خاموشی در بازه زمانی تعمیر و نگهداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. میزان خاموشی در هر یک از مراحل استهلاک و خرابی با توجه به نوع استراتژی تعمیرات تعیین می‌شود. مدت زمان خاموشی در زمان t به علت عدم قطعیت در نتیجه بازرسی به صورت متوسط در ابتدای افق برنامه‌ریزی فرمول‌بندی می‌شود. معادله (۸) هزینه مورد انتظار خاموشی و (۹) متوسط زمان خاموشی را نشان می‌دهد

$$EC\,\mathrm{int}_{i,t} = \mathrm{int}\,C_i \times d_{i,t}\ ,\ \forall i,t \qquad (۸)$$

$$d_{i,t} = Xins_{i,t} \times (dins_i \times \sum_{s\in \mathrm{Sin}\,s} p_{s,i,t} + d\min_i \times \sum_{s\in S\min} p_{s,i,t} + dmaj_i \times \sum_{s\in Smaj} p_{s,i,t}) + drep_i \times \sum_{s\in F} p_{s,i,t}\ ,\ \forall i,t \qquad (۹)$$

که $EC\,\mathrm{int}_{i,t}$ هزینه مورد انتظار خاموشی مود خرابی i در زمان t، $\mathrm{int}\,C_i$ هزینه هر ساعت خاموشی ناشی از خرابی مود خرابی i در زمان t، $d_{i,t}$ زمان مورد انتظار خاموشی مود خرابی i در زمان t، $dins_i$ زمان هر بار بازرسی مود خرابی i، $d\min_i$ زمان هر بار تعمیر جزئی مود خرابی i، $dmaj_i$ زمان هر بار تعمیر کلی مود خرابی i و $drep_i$ زمان هر بار تعویض مود خرابی i است.

۳-۴ هزینه حمل و نقل

هزینه حمل و نقل گروه تعمیر و نگهداری برای هر بار بازرسی در (۱۰) نشان داده شده است. هزینه حمل و نقل در صورت انجام بازرسی چندین مود خرابی در یک منطقه تعمیراتی، فقط یک مرتبه حساب می‌شود

$$Ctr_t = trC \times Max_i(Xins_{i,t})\ ,\ \forall t \qquad (۱۰)$$

که در آن Ctr_t هزینه حمل‌ونقل در زمان t و trC هزینه هر بار حمل‌ونقل است.

۳-۵ تابع هدف

تابع هدف برنامه‌ریزی تعمیرات شامل هزینه بازرسی، تعمیر جزئی و کلی، تعویض، ریسک خرابی و حمل‌ونقل با متغیرهای باینری تعریف می‌شود. در صورت انجام بازرسی، حالت استهلاک تجهیز پس از بازرسی مشخص می‌گردد و با توجه به استراتژی تعمیراتی مود خرابی، در مورد تعمیر یا عدم تعمیر تصمیم گرفته می‌شود و وضعیت استهلاک تجهیز تعیین می‌شود. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در فاز برنامه‌ریزی تعمیرات، برنامه‌ریزی با این فرض صورت می‌گیرد که وضعیت استهلاک تجهیز را قبل از بازرسی به صورت قطعی نمی‌دانیم و تنها توزیع احتمال استهلاک تجهیز را می‌دانیم. به عبارتی با یک برنامه‌ریزی تصادفی با متغیرهای باینری مواجه هستیم. زمان بازرسی در طول سال با کمینه‌کردن هزینه بازرسی، تعمیرات، تعویض، خاموشی و حمل‌ونقل به دست می‌آید. تابع هدف برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری به صورت (۱۱) فرمول‌بندی می‌شود

$$\underset{Xins_{i,t}}{Min} \sum_{i=۱}^{n}\sum_{t=۱}^{T} Xins_{i,t} \times (ECins_{i,t} + ECmain_{i,t}) + ECrep_{i,t} + EC\,\mathrm{int}_{i,t} + Ctr_t \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: انواع استراتژی‌های تعمیراتی.

شماره استراتژی	حالت ۱	حالت ۲	هزینه (دلار)
۱	عدم تعمیر	عدم تعمیر	۵۸۸۸/۴
۲	تعمیر جزئی	تعمیر جزئی	۲۶۳۷/۱
۳	تعمیر جزئی	تعمیر کلی	۲۵۱۴/۱
۴	عدم تعمیر	تعمیر جزئی	۲۹۹۹/۲
۵	عدم تعمیر	تعمیر کلی	۳۵۷۴/۲

تابع هدف مسئله حاصل‌جمع هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری و متغیر مسئله، زمان‌های بازرسی تجهیز است. در این مقاله فرض شده که تعمیرات بدون محدودیت هزینه و زمان گروه تعمیرات برنامه‌ریزی می‌شود. بدیهی است که محدودیت بودجه سالانه تعمیر و نگهداری و محدودیت‌های زمانی گروه تعمیرات می‌تواند به عنوان قید به تابع هدف مسئله اضافه شود.

٤- نتایج عددی

در این بخش مدل ارائه‌شده برای تعمیر و نگهداری یک ترانسفورماتور قدرت پیاده‌سازی می‌شود. بازه زمانی برنامه‌ریزی تعمیرات یک‌ساله و گام زمانی بازرسی به صورت ماهانه در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود ترانسفورماتور، یک مود خرابی غالب با فرایند استهلاک ۴حالته دارد. پارامترهای تعمیراتی ترانسفورماتور در جدول پ- ۱ در بخش پیوست آورده شده است. انواع استراتژی‌های تعمیراتی و هزینه‌های هر استراتژی برای ترانسفورماتور قدرت در جدول ۱ آمده است. مدل ارائه‌شده در برنامه GAMS و توسط solver DICOPT حل می‌شود.

با استفاده از مدل مارکوف تعمیر نگهداری مبتنی بر بازرسی در [۱۰]، نرخ بازرسی در مرحله ۱، ۴/۴ مرتبه در سال و نرخ بازرسی در مرحله ۲، ۱۲ مرتبه در سال به دست می‌آید. یعنی اگر تجهیز در مرحله ۱ باشد پس از ۲/۷ ماه (معادل ۸۱ روز) بازرسی بعدی باید انجام شود. پس از این بازرسی و با توجه به استراتژی تعمیراتی، زمان بازرسی بعدی بسته به وضعیت استهلاک پس از تعمیرات تعیین می‌شود. اگر خروجی بازرسی منجر به انتقال وضعیت سیستم به حالت ۲ شود، ۱ ماه بعد (معادل ۳۰ روز) زمان بازرسی بعدی خواهد بود. در مدل معرفی‌شده در این مقاله، زمان‌های بازرسی با توجه به فرایند استهلاک مارکوف و عدم قطعیت در نتایج خروجی در ابتدای بازه زمانی برنامه‌ریزی تعیین می‌شود. با توجه به این که برنامه فقط برای یک سال اجرا می‌شود، هزینه خروجی در این مدل کمتر از هزینه در [۱۰] برآورد می‌شود.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد استراتژی شماره ۳ یعنی تعمیر جزئی در مرحله ۲ و تعمیر کلی در مرحله ۳ استهلاک، استراتژی بهینه تعمیراتی برای ترانسفورماتور خواهد بود. طبق جدول ۲، ماه ۳ و ماه ۷ زمان‌های بهینه بازرسی تحت این استراتژی می‌باشند. برای مقایسه هزینه‌ها به صورت تفکیکی، این هزینه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. عدم انجام تعمیر و بازرسی در استراتژی ۱ باعث می‌شود که هزینه بازرسی، تعمیر و حمل و نقل صفر شود، اما از طرف دیگر منجر به افزایش ریسک خرابی و هزینه مربوط به آن نسبت به سایر استراتژی‌ها می‌گردد. بنابراین انجام بازرسی در طول سال به منظور کاهش هزینه مرتبط با ریسک خرابی توصیه می‌شود.

استراتژی‌های ۲ تا ۵ که همراه با بازرسی و تعمیر هستند، هزینه بازرسی و حمل و نقل مشابهی دارند. هزینه تعمیرات استراتژی‌هایی که تحت تعمیر جزئی و کلی قرار می‌گیرند نسبت به استراتژی‌هایی که تنها در یک مرحله تحت تعمیر قرار می‌گیرند و یا فقط تعمیر کلی می‌شوند، بیشتر است. در استراتژی ۳ ترکیب تعمیر جزئی و کلی اگرچه باعث افزایش هزینه تعمیرات می‌شود، اما نوع تعمیر در هر مرحله و زمان تعمیر در طول سال، باعث کاهش ریسک خرابی و هزینه تعویض می‌شود. هزینه خاموشی در استراتژی ۲ و ۳ به علت احتمال تعمیر بیشتر نسبت به استراتژی ۴ و ۵ بیشتر است اما این کاهش هزینه خاموشی در استراتژی ۴ و ۵، باعث هزینه سه برابری ریسک خرابی نسبت به استراتژی‌های ۲ و ۳ می‌شود.

٤-١ اثر هزینه بازرسی

هزینه بازرسی در هر ماه شامل هزینه مواد و تجهیزات لازم برای بازرسی و نیروی کار می‌شود. تغییر هزینه بازرسی می‌تواند اثر زیادی بر استراتژی و زمان‌بندی تعمیرات بگذارد. جدول ۴ استراتژی بهینه تعمیراتی را تحت هزینه‌های بازرسی مختلف نشان می‌دهد. اگر هزینه هر بار بازرسی ترانسفورماتور، ۵۰ دلار باشد می‌توان با افزایش تعداد بازرسی در طول سال و فقط با انجام تعمیر کلی در حالت ۳ استهلاک، تعمیر و نگهداری تجهیز را برنامه‌ریزی کرد. با افزایش هزینه بازرسی، تعداد دفعات بازرسی، کاهش و هزینه کلی تعمیرات افزایش می‌یابد. اگر هزینه بازرسی مود خرابی ۲۰۰ دلار باشد با ۳ مرتبه بازرسی در طول سال و تنها با تعمیرات جزئی می‌توان تعمیرات بهینه را پیاده‌سازی کرد.

٤-٢ اثر هزینه خاموشی

هزینه خاموشی یا هزینه بار از دست رفته به مقدار بار، جریمه ناشی از خاموشی و یا سود از دست رفته بستگی دارد. هزینه خاموشی، استراتژی تعمیراتی را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد. جدول ۵ استراتژی بهینه تعمیراتی را برای مقادیر متفاوت هزینه یک ساعت خاموشی نشان می‌دهد. با افزایش هزینه خاموشی به ۱۰۰ دلار بر ساعت، زمان بازرسی از ماه هفتم به ماه ششم تغییر می‌یابد. اگر هزینه تا ۲۰۰ دلار بر ساعت افزایش یابد، استراتژی تعمیراتی به گونه‌ای تغییر می‌یابد تا تعمیر کمتری روی تجهیز انجام شود و هزینه خاموشی ناشی از تعمیرات کاهش یابد. پس افزایش هزینه خاموشی منجر به کاهش تعداد بازرسی و انجام تعمیرات در ماه‌های اولیه بهره‌برداری تجهیز می‌شود.

تعمیر و نگهداری به طور کلی به دو دسته تعمیر و نگهداری سطح قطعه و سطح سیستم تقسیم‌بندی می‌شود. تعیین استراتژی تعمیراتی در سطح قطعه، پیش‌نیاز بهینه‌سازی تعمیرات در سطح سیستم است. به منظور مدیریت دارایی تجهیزات در شرکت‌های برق و به علت محدودیت منابع تعمیرات و بودجه، برنامه تعمیر و نگهداری باید برای تمام تجهیزات در سطح سیستم بهینه‌سازی شود. تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور روشی برای تعمیرات سطح سیستم است که پس از آنالیز مود و اثرات خرابی و تعیین قطعات بحرانی[1] در شبکه، استراتژی تعمیراتی بهینه را با توجه به قیود موجود در شبکه ارائه می‌دهد. اولویت‌بندی تجهیزات، نوع تعمیرات و زمان‌بندی تعمیرات، خروجی تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور است. مدل ارائه‌شده در این مقاله به منظور تعیین استراتژی بهینه تعمیراتی یک مود خرابی شامل نوع و زمان‌بندی تعمیرات در سطح قطعه است. در ادامه، بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری در سطح سیستم با استفاده از مدل معرفی‌شده و لحاظ‌کردن قیود مختلف از جمله بودجه، ریسک و قابلیت اطمینان، نیروی کار و محدودیت‌های بهره‌برداری پیشنهاد می‌گردد.

1. Critical Components

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲: برنامه زمان‌بندی تعمیرات تحت استراتژی‌های تعمیراتی.

شماره استراتژی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱												
۲				×				×				
۳			×				×					
۴						×			×			
۵						×			×			

جدول ۳: هزینه تفکیکی تعمیر و نگهداری تحت استراتژی‌های تعمیراتی.

شماره استراتژی	بازرسی	تعمیر	تعویض	خاموشی	حمل‌ونقل	کل
۱	۰	۰	۵۸۲۱٫۴	۶۶٫۹۲۹	۰	۵۸۸۸٫۴
۲	۹۹۹٫۸۲	۶۳۵٫۰۲	۸۷۵٫۵۴	۶۶٫۷۰۴	۶۰	۲۶۳۷٫۱
۳	۹۹۹٫۹۲	۷۶۴٫۲۷	۶۲۴٫۰۴	۶۵٫۸۳۱	۶۰	۲۵۱۴٫۱
۴	۹۹۹٫۷	۵۸٫۸۵۴	۱۸۳۹٫۷	۴۰٫۹۱۳	۶۰	۲۹۹۹٫۲
۵	۹۹۹٫۷	۶۸۸٫۶۳	۱۷۶۳٫۹	۶۱٫۹۷۶	۶۰	۳۵۷۴٫۲

جدول ۴: استراتژی و زمان‌بندی تعمیرات تحت هزینه‌های بازرسی مختلف.

هزینه بازرسی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	استراتژی بهینه
۵۰			×		×		×	×	×	×	×		۴
۲۰۰			×			×			×				۲
۵۰۰			×				×						۳

جدول ۵: استراتژی و زمان‌بندی تعمیرات تحت هزینه‌های خاموشی مختلف.

هزینه خاموشی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	استراتژی بهینه
۸			×				×						۳
۱۰۰			×			×							۳
۲۰۰						×							۴

جدول پ- ۱: پارامترهای تعمیراتی ترانسفورماتور [۶].

پارامتر	ترانسفورماتور
$insC_i$ ($)	۵۰۰
$\min C_i$ ($)	۳۰۰۰
$majC_i$ ($)	۳۶۰۰۰
$repC_i$ ($)	۱۰۰۰۰۰۰
$\text{int}\,C_i$ ($/h)	۸
$dins_i$ (h)	۱
$d\min_i$ (h)	۲۴
$dmaj_i$ (day)	۷
$drep_i$ (day)	۶۰
trC ($)	۳۰
$\lambda_{۱۲}$ (occ/year)	۰٫۳۳
$\lambda_{۲۳}$ (occ/year)	۰٫۲۵
$\lambda_{۲F}$ (occ/year)	۰٫۳۶
ts (year)	۰٫۰۸۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه تعمیر و نگهداری مبتنی بر بازرسی یک مود خرابی بر اساس مدل مارکوف فرایند استهلاک و تابع توزیع احتمالاتی آن فرموله شد. در این مدل با معرفی ماتریس استراتژی تعمیراتی، اثر بازرسی بر تابع توزیع احتمال خرابی یک تجهیز در طول سال تعیین شد و با مقایسه هزینه کلی تعمیرات استراتژی‌های مختلف، استراتژی تعمیراتی بهینه شامل نوع و مدت‌زمان تعمیر و زمان‌های بازرسی در طول سال به دست آمد. همچنین با آنالیز حساسیت نشان داده شد که هزینه بازرسی و هزینه خاموشی بر استراتژی بهینه تعمیرات تأثیر می‌گذارد و زمان بازرسی و نوع تعمیرات روی تجهیز را دستخوش تغییر می‌کند. از این مدل برای برنامه‌ریزی تعمیرات تجهیزاتی استفاده شد که در یک منطقه تعمیراتی قرار دارند و همزمانی تعمیرات آنها می‌تواند موجب کاهش زمان خاموشی ناشی از تعمیرات و حمل و نقل شود تا بتوان برنامه زمان‌بندی هماهنگ تعمیرات تجهیزات یک منطقه را در طول سال به‌دست آورد. همچنین از این مدل برای بهینه‌سازی و زمان‌بندی تعمیرات تمام مودهای خرابی تجهیزات یک سیستم می‌توان استفاده کرد. به عبارتی با مدل‌سازی برنامه‌ریزی تعمیرات در سطح قطعه، ابزاری برای برنامه‌ریزی تعمیرات در سطح سیستم فراهم می‌شود تا با اولویت‌بندی فعالیت‌های تعمیراتی و تعیین اهمیت تجهیزات در سیستم، تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان‌محور پیاده‌سازی شود.

پیوست

پارامترهای تعمیراتی ترانسفورماتور در جدول پ- ۱ آمده است.

مراجع

[1] M. E. Beehler, "Reliability centered maintenance for transmission systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 1023-1028, Apr. 1997.

www.SID.ir

Archive of SID

[2] J. Endrenyi, *et al.*, "The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 638-646, Nov. 2001.

[3] J. Endrenyi, G. J. Anders, and A. M. Leite da Silva, "Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on reliability. An application [to power systems]," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 576-583, May 1998.

[4] P. Jirutitijaroen and C. Singh, "The effect of transformer maintenance parameters on reliability and cost: a probabilistic model," *Electric Power Systems Research*, vol. 72, no. 3, pp. 213-224, Dec. 2004.

[5] G. K. Chan and S. Asgarpoor, "Optimum maintenance policy with Markov processes," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 6-7, pp. 452-456, Apr. 2006.

[6] S. K. Abeygunawardane, P. Jirutitijaroen, and H. Xu, "Adaptive maintenance policies for aging devices using a markov decision process," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3194-3203, Aug. 2013.

[7] H. Ge and S. Asgarpoor, "Reliability and maintainability improvement of substations with aging infrastructure," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 1868-1876, Oct. 2012.

[8] R. E. Brown, G. Frimpong, and H. L. Willis, "Failure rate modeling using equipment inspection data," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 782-787, May 2004.

[9] T. M. Welte, "Using state diagrams for modeling maintenance of deteriorating systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 58-66, Feb. 2009.

[10] S. K. Abeygunawardane and P. Jirutitijaroen, "New state diagrams for probabilistic maintenance models," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2207-2213, Nov. 2011.

[11] S. K. Abeygunawardane and P. Jirutitijaroen, "Application of probabilistic maintenance models for selecting optimal inspection rates considering reliability and cost tradeoff," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 178-186, Feb. 2014.

[12] N. Moslemia, M. Kazemia, S. M. Abedib, H. Khatibzadeh-Azada, and M. Jafarianc, "Mode-based reliability centered maintenance in transmission system," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 12, no. 4, Article ID. e2289, Apr. 2016.

[13] N. Moslemi, M. Kazemi, S. M. Abedi, H. Khatibzadeh-Azad, and M. Jafarian, "Maintenance scheduling of transmission systems considering coordinated outages," *IEEE Systems Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 178-186, Dec. 2018.

[14] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems-part i: methodology," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 761-770, Apr. 2013.

[15] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A comprehensive scheme for reliability-centered maintenance in power distribution systems-part ii: numerical analysis," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 771-778, Apr. 2013.

[16] P. A. Kuntz, R. D. Christie, and S. S. Venkata, "A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 718-723, Oct. 2001.

[17] 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. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 75-82, Feb. 2005.

[18] A. D. Janjic and D. S. Popovic, "Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 597-604, May 2007.

[19] A. Abiri-Jahromi, M. Fotuhi-Firuzabad, and E. Abbasi, "An efficient mixed-integer linear formulation for long-term overhead lines maintenance scheduling in power distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2043-2053, Oct. 2009.

[20] F. Campelo, L. S. Batista, R. H. C. Takahashi, H. E. P. Diniz, and E. G. Carrano, "Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2087-2097, Sept. 2016.

[21] J. Zhong, W. Li, C. Wang, J. Yu, and R. Xu, "Determining optimal inspection intervals in maintenance considering equipment aging failures," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1474-1482, Mar. 2017.

[22] Y. Jiang, J. D. McCalley, and T. Van Voorhis, "Risk-based resource optimization for transmission system maintenance," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1191-1200, Aug. 2006.

[23] G. Balzer, *et al.*, "Selection of an optimal maintenance and replacement strategy of H.V. Equipment by a risk assessment process," CIGRE Report, 2006.

[24] J. H. Heo, *et al.*, "A reliability-centered approach to an optimal maintenance strategy in transmission systems using a genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2171-2179, Oct. 2011.

[25] A. Abiri-Jahromi, M. Parvania, F. Bouffard, and M. Fotuhi-Firuzabad, "A two-stage framework for power transformer asset maintenance management-part i: models and formulations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1395-1403, May 2013.

[26] A. Abiri-Jahromi, M. Parvania, F. Bouffard, and M. Fotuhi-Firuzabad, "A two-stage framework for power transformer asset maintenance management-part ii: validation results," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1404-1414, May 2013.

[27] M. Abbasghorbani and H. R. Mashhadi, "Circuit breakers maintenance planning for composite power systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 10, pp. 1135-1143, Oct. 2013.

[28] M. Abbasghorbani, H. R. Mashhadi, and Y. Damchi, "Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 9, pp. 1583-1590, Sep. 2014.

[29] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd Ed. New York: Plenum, 1992.

مرتضی صمدی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق در دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری در سیستم‌های قدرت و بازار برق است.

حسین سیفی تحصیلات خود در مقطع کارشناسی را در سال ۱۳۵۹ در رشته مهندسی برق در دانشگاه شیراز به اتمام رساند و مقاطع کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ در زمینه مهندسی برق گرایش قدرت در دانشگاه UMIST انگلستان با موفقیت سپری نمود. هم‌اکنون ایشان استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس و رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشد. زمینه‌های مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

محمودرضا حقی‌فام تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق به ترتیب در سال های ۱۳۶۹، ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ از دانشگاه تبریز، تهران و تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان قابلیت اطمینان، شبکه توزیع و بازار برق است.

www.SID.ir