

مدل سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان با استفاده از مدل مارکوف

امیرمحمد اسماعیل نژادکدکنی^۱، یاسر دامچی^۲، امید حقگو^۳

^۱ دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

esmailnejad@shahroodut.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

damchi@shahroodut.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

omid.haghgoo@shahroodut.ac.ir

چکیده

ترانسفورماتور جریان یکی از تجهیزات اندازه‌گیری در سیستم‌های قدرت می‌باشد که به طور گسترده در شبکه قدرت به‌منظور آماده‌سازی سیگنال جریان برای تجهیزات نظارتی، حفاظتی و اندازه‌گیری به کار می‌رود. دقت اندازه‌گیری این تجهیز در کارکرد صحیح شبکه قدرت حفاظتی و در نهایت پایداری سیستم نقش بسیار مهمی دارد. این مسئله نیازمند ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیز در طول عمر آن است. تاکنون مدل مناسبی به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان ارائه نشده است؛ بنابراین در این مقاله یک مدل مارکوف جهت ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان پیشنهاد می‌شود. برای دستیابی به مدل مارکوف پیشنهادی، ابتدا ترانسفورماتور جریان به پنج عنصر تشکیل‌دهنده اصلی تقسیم می‌شود که شامل: سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، هسته، بوشینگ، مایع عایقی روغن و بخش خنک‌سازی می‌باشد. برای دستیابی به مدل دقیق، ابتدا برای هر یک از زیربخش‌های مذکور یک مدل مارکوف پیشنهاد می‌شود سپس با تجمیع مدل‌های مارکوف حاصل یک مدل ۱۷ حالتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان ارائه می‌شود. مدل نهایی دارای سه حالت متشکل از حالت‌های سالم، کیفیت پایین و از کار افتادگی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی، حاکی از کارایی مطلوب مدل مارکوف پیشنهادی با موفقیت در ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان است.

کلمات کلیدی

ترانسفورماتور جریان، قابلیت اطمینان، مدل مارکوف.

قدرت، در تجهیزات مختلف به‌عنوان یک ضرورت مهم مدنظر می‌باشد.

تقویت عملکرد سیستم حفاظتی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای حفظ

پیوستگی سیستم قدرت در سطح مطلوب محسوب می‌شود. سیگنال

۱- مقدمه

به دلیل توسعه روزافزون شبکه‌های قدرت قابلیت اطمینان سیستم

مدل مارکوف استفاده نموده است. در [۱۰]، قابلیت اطمینان یک کلید فشار قوی DC، با کمک مدل مارکوف ارزیابی شده است. در [۱۱]، زمان بهینه تست‌های دوره‌ای و خودبازبینی، قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی یک ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تأثیر خطای انسانی با استفاده از یک مدل مارکوف ۱۷ حالت تعیین می‌شود. در [۱۲]، یک مدل مارکوف جهت تعیین نرخ نظارت بهینه کلید فشار قوی در شبکه توزیع ارائه شده و قابلیت اطمینان سیستم فرض شده ارزیابی شده است. در [۱۳]، یک مدل مارکوف برای ارزیابی ترانسفورماتور قدرت (ONAN) ارائه شده است. در این مطالعه، دو زیرمجموعه برای ترانسفورماتور قدرت لحاظ شده است. در [۱۴]، از مدل مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت (ONAF) استفاده شده است. در این مرجع، ترانسفورماتور قدرت به سه زیرمجموعه تقسیم شده است؛ برای هر زیرمجموعه یک مدل مارکوف ارائه شده و سپس با تجمیع مدل‌های مارکوف بدست آمده، یک مدل مارکوف جامع برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت ONAF استخراج شده است. در [۱۵]، با استفاده از مدل‌سازی مارکوف، یک مدل ۱۰ حالت برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور ولتاژ خازنی به عنوان یکی از تجهیزات سیستم حفاظتی ارائه شده است. در این تحقیق، ترانسفورماتور ولتاژ خازنی به سه زیرمجموعه تقسیم شده است. مدل مارکوف نهایی با تجمیع مدل مارکوف زیرسیستم‌ها جهت ارزیابی قابلیت اطمینان یک ترانس ولتاژ خازنی بدست می‌آید. ساختار این مقاله در ادامه بصورت زیر است. در بخش ۲، به اختصار به معرفی و نحوه عملکرد زیرسیستم‌های مختلف ترانسفورماتور جریان پرداخته می‌شود. در بخش ۳، یک مدل قابلیت اطمینان جدید مبتنی بر مدل مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان CT پیشنهاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی در بخش ۴ ارائه می‌گردد. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه می‌شود.

۲- ترانسفورماتور جریان

ترانسفورماتورهای جریان یکی از اجزای اصلی در سیستم‌های حفاظتی شبکه قدرت می‌باشد که دلیل کاربردهای اندازه‌گیری و حفاظتی در شبکه قدرت استفاده می‌شوند. طبق مطالعات آماری، حدود ۱۲ درصد از خطاهای سیستم قدرت به دلیل مشکلات ترانسفورماتور جریان رخ می‌دهد [۱۶]. بنابراین، ارزیابی قابلیت اطمینان و پیش وضعیت ترانسفورماتور جریان در طول عمر آن‌ها از اهمیت بالایی

ورودی رله‌های حفاظتی جهت اجرای وظایف حفاظتی و کنترلی از طریق تجهیزات اندازه‌گیری تأمین می‌شود و عملکرد رله‌ها به این سیگنال‌ها بستگی دارد؛ بنابراین، حفظ دقت این تجهیزات در طول دوره عمر آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور اطمینان از عملکرد صحیح، ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان (CT) ضروری است و اقدامات تعمیر و نگهداری باید به صورت موازی با شرایط کاری تجهیز هماهنگ شوند.

به طور کلی، برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک تجهیز دو روش پرکاربرد به کار گرفته می‌شود: روش شبیه‌سازی و روش تحلیلی. استفاده از روش مشابه‌سازی برای تخمین الگوی رفتار سیستم در طول یک دوره زمانی خاص مناسب است؛ و در این زمینه روش شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان یکی از راهکارهای متداول استفاده می‌شود. علاوه بر این، روش‌های تحلیلی نیز از جمله ابزارهای مؤثر در ارزیابی قابلیت اطمینان می‌باشند که می‌توان به عنوان مثال روش‌های درخت رخدادها، درخت معایب و مدل مارکوف را نام برد. روش‌های تحلیل بر پایه تئوری ریاضی فرآیندها عمل می‌کنند. در نتیجه، استفاده از هر یک از این روش‌ها بسته به موقعیت و مسائل مورد نظر توصیه می‌شود [۱]. در [۲]، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، به صورت تصادفی تجهیزات یک پست فشار قوی در حالت خرابی قرار می‌گیرند. سپس، شاخص‌های قابلیت اطمینان پست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در [۳]، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده با استفاده از مدل مارکوف نهایی ۴ حالت انجام می‌شود. در [۴]، قابلیت اطمینان شبکه توزیع متصل به پست فشار قوی به کمک مدل‌سازی زنجیره مارکوف ارزیابی می‌شود. در [۵]، مدلی بر اساس مدل مارکوف پنهان برای ارزیابی قابلیت اطمینان واحد اندازه‌گیری فازور ارائه شده است. در [۶]، از مدل مارکوف ۱۷ حالت برای ارزیابی قابلیت اطمینان و تعیین زمان بهینه تست‌های دوره‌ای و خودبازبینی رله‌های حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ برای رله‌ها، استفاده شده است. در [۷]، با در نظر گرفتن حفاظت‌های اصلی و پشتیبان برای حفاظت خط، قابلیت اطمینان یک رله حفاظتی یک رله دیجیتال با احتمال خرابی‌های مختلف به کمک مدل مارکوف ارزیابی و تحلیل می‌نماید. در [۸]، با در نظر گرفتن احتمال خرابی حفاظت پشتیبان، زمان بهینه تست‌های دوره‌ای و خودبازبینی با استفاده از یک مدل مارکوف ۲۱ حالت تعیین نموده است. در [۹]، برای ارزیابی قابلیت اطمینان راکتور متغیر استاتیکی از

۳- مدل مارکوف پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت

اطمینان ترانسفورماتور جریان

در این مطالعه برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای جریان از مدل‌سازی مارکوف استفاده می‌شود.

برای استخراج مدل مارکوف CT، در ابتدا برای هر یک از زیربخش‌های عایق روغن و محفظه خنک‌سازی، سیم‌پیچ‌ها، هسته و پوشینگ پیشنهاد می‌شود. سپس بر اساس قواعد روش فراوانی و تداوم حالت‌ها، مدل مارکوف ۱۷ حالتی ترانسفورماتور جریان جهت ارزیابی قابلیت اطمینان این تجهیز ارائه می‌شود. لازم به ذکر است در این مقاله فرض شده است که در هر لحظه یک عنصر دچار خرابی شده است.

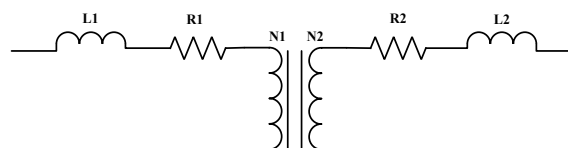
۳-۱- مدل مارکوف زیرسیستم عایق روغن و محفظه

خنک‌سازی

طبق استاندارد [۱۸]، زیرسیستم عایق روغن و محفظه خنک‌سازی از دو بخش عایق روغن و محفظه گاز جهت خنک‌کاری عایق روغن تشکیل شده است. لازم به ذکر است که اگر محفظه خنک‌سازی دچار مشکل شود منجر به از کار افتادن ترانسفورماتور جریان نمی‌شود، بلکه ممکن است خاصیت عایقی و طول عمر روغن با توجه به عدم خنک‌کاری، کمتر شود. بنابراین می‌تواند دقت جریان اندازه‌گیری شده تحت تأثیر قرار بگیرد که در این حالت اصطلاحاً زیرسیستم عایق روغن وارد حالت کیفیت-کم می‌شود. بنابراین یک مدل مارکوف برای زیرسیستم عایق روغن و محفظه خنک‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. این نکته هم شایان ذکر می‌باشد که با انجام تست دوره‌ای توسط نیروی انسانی فقط خاصیت روغنی و ترمینال‌های این تجهیز چک می‌شود و بنابراین، اگر برای محفظه خنک‌سازی عایق روغن مشکلی رخ بدهد در تست دوره‌ای تا زمانی که روغن از محفظه عایقی سرریز نشده و CT دچار مشکل نمی‌گردد؛ خرابی در زیرسیستم محفظه خنک‌سازی با سرریز شدن روغن قابل شناسایی خواهد بود.

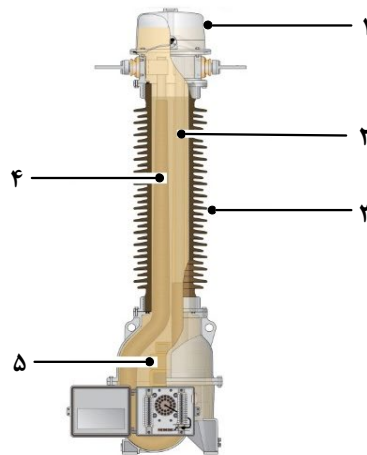
برخوردار است. برای ارزیابی قابلیت اطمینان این تجهیز نیاز به ارائه یک مدل مناسب می‌باشد.

به‌منظور ارائه یک مدل مناسب، باید ساختار CT به‌طور دقیق شناسایی شود. شکل ۱ ساختار مداری CT را نشان می‌دهد؛ N_1 و N_2 ، به ترتیب بیانگر تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، R_1 و R_2 ، به ترتیب بیانگر مقاومت سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه و L_1 و L_2 ، به ترتیب بیانگر اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه می‌باشد.



شکل ۱. ساختار مداری ترانسفورماتور جریان

شکل ۲ ساختار یک ترانسفورماتور جریان که به‌طور کلی از ۵ عنصر تشکیل شده است را نشان می‌دهد. عدد ۱ بیانگر محفظه خنک‌سازی گاز، عدد ۲ بیانگر مایع عایقی روغن، عدد ۳ بیانگر پوشینگ، عدد ۴ بیانگر سیم‌پیچ اولیه و عدد ۵ بیانگر هسته و سیم‌پیچ ثانویه می‌باشند [۱۷]. در این مطالعه، عناصر عایق روغن و محفظه گاز خنک‌سازی عایق روغن با هم در نظر گرفته شده است؛ و سایر زیربخش‌ها به صورت جداگانه در مدل پیشنهادی ارائه شد. این نکته قابل ذکر است در صورت مشکل در بخش محفظه خنک‌کننده گازی مشکلی در عملکرد ترانسفورماتور جریان پیش نمی‌آید و خاصیت عایقی روغن کم می‌شود و عملیات خنک‌سازی انجام نمی‌شود. در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، سیم‌پیچ اولیه با قطر بالا و به همراه عایق کاغذی با تعداد دور کم و سیم‌پیچ ثانویه با تعداد دور خیلی بالا و ضخامت کم به دور هسته پیچیده شده‌اند. جنس پوشینگ معمولاً از جنس عایق چینی می‌باشد.



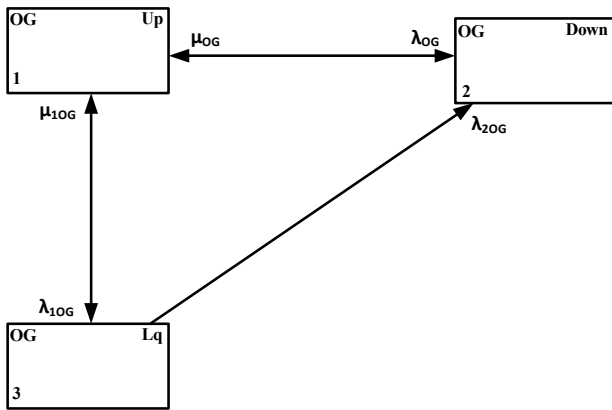
شکل ۲. ساختار فیزیکی ترانسفورماتور جریان [۱۷]

$$P_{1OG} = P_{A1} \quad (4)$$

$$P_{2OG} = P_{D1} + P_{B1} \quad (5)$$

$$P_{3OG} = P_{C1} \quad (6)$$

در این رابطه‌ها P_{1OG} ، P_{2OG} و P_{3OG} به ترتیب احتمال حالات عملکردی سالم، خراب و کیفیت-کم زیرسیستم OG مطابق شکل ۴ می‌باشند. در نهایت بر اساس قواعد روش فراوانی و تداوم حالت‌ها، یک مدل مارکوف نهایی ۳ حالت مطابق شکل ۴ برای زیرسیستم OG پیشنهاد می‌شود.



شکل ۴. مدل مارکوف معادل زیرسیستم عایق روغن و خنک‌سازی

برای محاسبه نرخ‌های خرابی و تعمیر معادل از رابطه‌های (۷) الی (۱۱) استفاده می‌شود.

$$\lambda_{OG} = \frac{f_{12OG}}{P_{1OG}} = \frac{f_{A1B1}}{P_{A1}} = \frac{\lambda_{Oil} P_{A1}}{P_{A1}} = \lambda_{Oil} \quad (7)$$

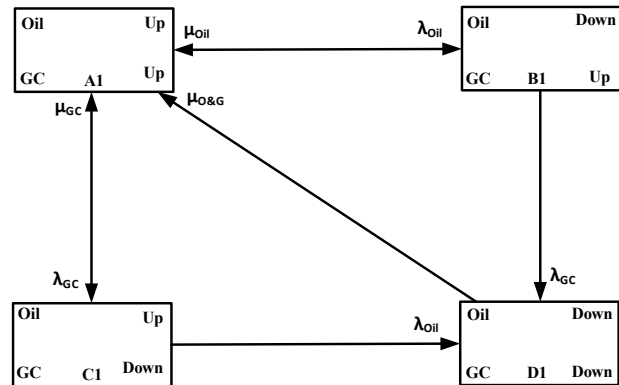
$$\lambda_{1OG} = \frac{f_{13OG}}{P_{1OG}} = \frac{f_{A1C1}}{P_{A1}} = \frac{\lambda_{GC} P_{A1}}{P_{A1}} = \lambda_{GC} \quad (8)$$

$$\lambda_{2OG} = \frac{f_{32OG}}{P_{3OG}} = \frac{f_{C1D1}}{P_{C1}} = \frac{\lambda_{Oil} P_{C1}}{P_{C1}} = \lambda_{Oil} \quad (9)$$

$$\mu_{OG} = \frac{f_{21OG}}{P_{2OG}} = \frac{f_{B1A1} + f_{D1A1}}{P_{2OG}} = \frac{\mu_{Oil} P_{B1} + \mu_{OG} P_{D1}}{P_{B1} + P_{D1}} \quad (10)$$

$$\mu_{1OG} = \frac{f_{31OG}}{P_{3OG}} = \frac{f_{C1A1}}{P_{C1}} = \frac{\mu_{GC} P_{C1}}{P_{C1}} = \mu_{GC} \quad (11)$$

در رابطه‌های (۷) الی (۱۱) λ_{OG} ، λ_{1OG} ، λ_{2OG} و μ_{OG} به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی زیربخش عایق روغن و خنک‌سازی، نرخ خرابی از حالت سالم به حالت کیفیت-کم زیربخش عایق روغن و خنک‌سازی، نرخ خرابی از حالت کیفیت-کم به حالت خراب، نرخ تعمیر



شکل ۳. مدل مارکوف گسترده زیرسیستم عایق روغن و خنک‌سازی

در مدل پیشنهادی شکل ۳، λ_{GC} ، λ_{Oil} ، μ_{Oil} ، μ_{OG} و μ_{GC} به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی روغن، نرخ خرابی محفظه گاز خنک‌کننده، نرخ تعمیر روغن، نرخ تعمیر محفظه گاز خنک‌کننده و نرخ تعمیر همزمان روغن و محفظه گاز خنک‌کننده می‌باشد. حالت A1 مربوط به عملکرد سالم زیرسیستم عایق روغن و محفظه خنک‌سازی روغن می‌باشد. حالت B1 و D1 مربوط به حالت خراب و حالت C1 مربوط به حالت کیفیت-کم زیرسیستم عایق روغن و خنک‌سازی می‌باشد. برای محاسبه ارزیابی قابلیت اطمینان شکل ۳، احتمال حالت‌ها باید محاسبه شوند. احتمال حالت‌ها (P_{OG}) با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شوند [۱]. در این رابطه A_{OG} ماتریس گذار است که به وسیله رابطه (۲) تعریف می‌گردد. در معادله (۲) b_{OGij} نرخ گذار از حالت i به حالت j است.

$$P_{OG} = A_{OG} P_{OG} \quad (1)$$

$$P_{OG} = [P_{OG1}, P_{OG2}, P_{OG3}, P_{OG4}]$$

$$A_{OG} = \begin{cases} A_{ogij} = b_{ogij} & i = A1, B1, C1, D1 \\ A_{ogii} = 1 - \sum_{j \neq i} b_{ogij} & j = A1, B1, C1, D1 \end{cases} \quad (2)$$

از آنجایی که دستگاه معادله (۱) وابسته خطی است، بنابراین برای حل آن نیاز به یک رابطه کمکی (۳) می‌باشد.

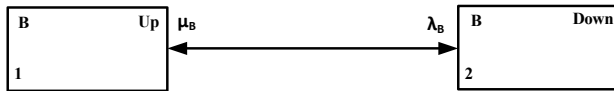
$$\sum_{i=A1}^{D1} P_{OGi} = 1 \quad (3)$$

در معادله (۳)، P_{OGi} احتمال حالت‌های گذرای زیرسیستم عایق روغن و خنک‌سازی می‌باشد که نشان می‌دهد مجموع احتمال حالت‌های تشکیل‌دهنده ماتریس گذار برابر یک می‌باشد.

احتمال حالت‌های مدل مارکوف معادل زیرسیستم OG مطابق با

شکل ۴ به کمک روابط (۴) الی (۶) قابل محاسبه است.

را نشان می‌دهد. در شکل ۷، λ_B و μ_B به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی بوشینگ و نرخ تعمیر آن می‌باشد.



شکل ۷. مدل مارکوف بوشینگ

۳-۵- مدل مارکوف نهایی ترانسفورماتور جریان

در این بخش برای تعیین مدل مارکوف نهایی پیشنهادی CT، مدل مارکوف زیر سیستم OG به همراه مدل مارکوف زیربخش‌های ه‌سته، سیم‌پیچ‌ها و بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور جریان با هم ترکیب نموده و مدل مارکوف نهایی برای ترانسفورماتور جریان مطابق با شکل ۸ بدست می‌آید. لازم به ذکر است که سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ ثانویه معادل یک عنصر در نظر گرفته شده است. در شکل ۸، حالت ۱، مربوط به عملکرد سالم ترانسفورماتور جریان می‌باشد در صورت بروز مشکل در محفظه گاز خنک‌کننده از حالت ۱ وارد حالت ۲ می‌شود و بیانگر کارکرد با کیفیت-کم تجهیز می‌باشد و دیگر حالت‌های شکل ۸ مربوط به حالت خراب ترانسفورماتور جریان می‌باشد.

احتمال هر یک از حالت‌های شکل ۸ با استفاده از رابطه (۱۲) و برای تشکیل ماتریس گذار A_{CT} مدل مارکوف گسترده CT مطابق با شکل ۸ از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. در این روابط P_{CT} احتمال حالت‌های ممکن و b_{CTij} نرخ گذار از حالت i به حالت j است.

$$P_{CT} = A_{CT} P_{CT} \quad (12)$$

$$P_{CT} = [P_{CT1}, P_{CT2}, P_{CT3}, \dots, P_{CT17}]$$

$$A_{CT} = \begin{cases} A_{CTij} = b_{CTij} & i = 1, 2, 3, \dots, 17 \\ A_{CTii} = 1 - \sum_{j, j \neq i} b_{CTij} & j = 1, 2, 3, \dots, 17 \end{cases} \quad (13)$$

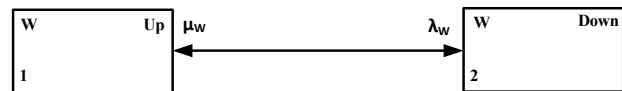
این نکته قابل ذکر است که با توجه به وابستگی خطی دستگاه رابطه (۱۲)، برای حل آن نیاز به معادله کمکی دیگر که به کمک رابطه (۱۴) نشان داده شده است، می‌باشد.

$$\sum_{i=1}^{17} P_{CTi} = 1 \quad (14)$$

زیربخش عایق روغن و خنک‌سازی و نرخ تعمیر از حالت کیفیت-کم به حالت سالم می‌باشد. در رابطه‌های (۷) الی (۱۱)، f_{OGij} فرکانس جابه جایی گذرا از حالت i به حالت j می‌باشد.

۳-۲- مدل مارکوف سیم‌پیچ‌ها

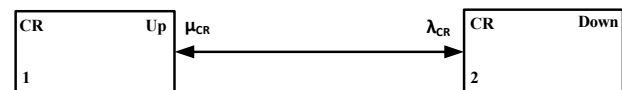
از آنجایی که با خرابی در سیم‌پیچ‌های CT باعث از کار افتادن CT می‌شود؛ بنابراین، مدل مارکوف سیم‌پیچ‌ها مطابق شکل ۵ است؛ بنابراین دو حالت سالم و خراب برای این تجهیز می‌توان در نظر گرفت. شکل ۵ مدل مارکوف دو حالت سیم‌پیچ‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۵، λ_W و μ_W به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه و نرخ تعمیر آن‌ها می‌باشد.



شکل ۵. مدل مارکوف سیم‌پیچ

۳-۳- مدل مارکوف هسته

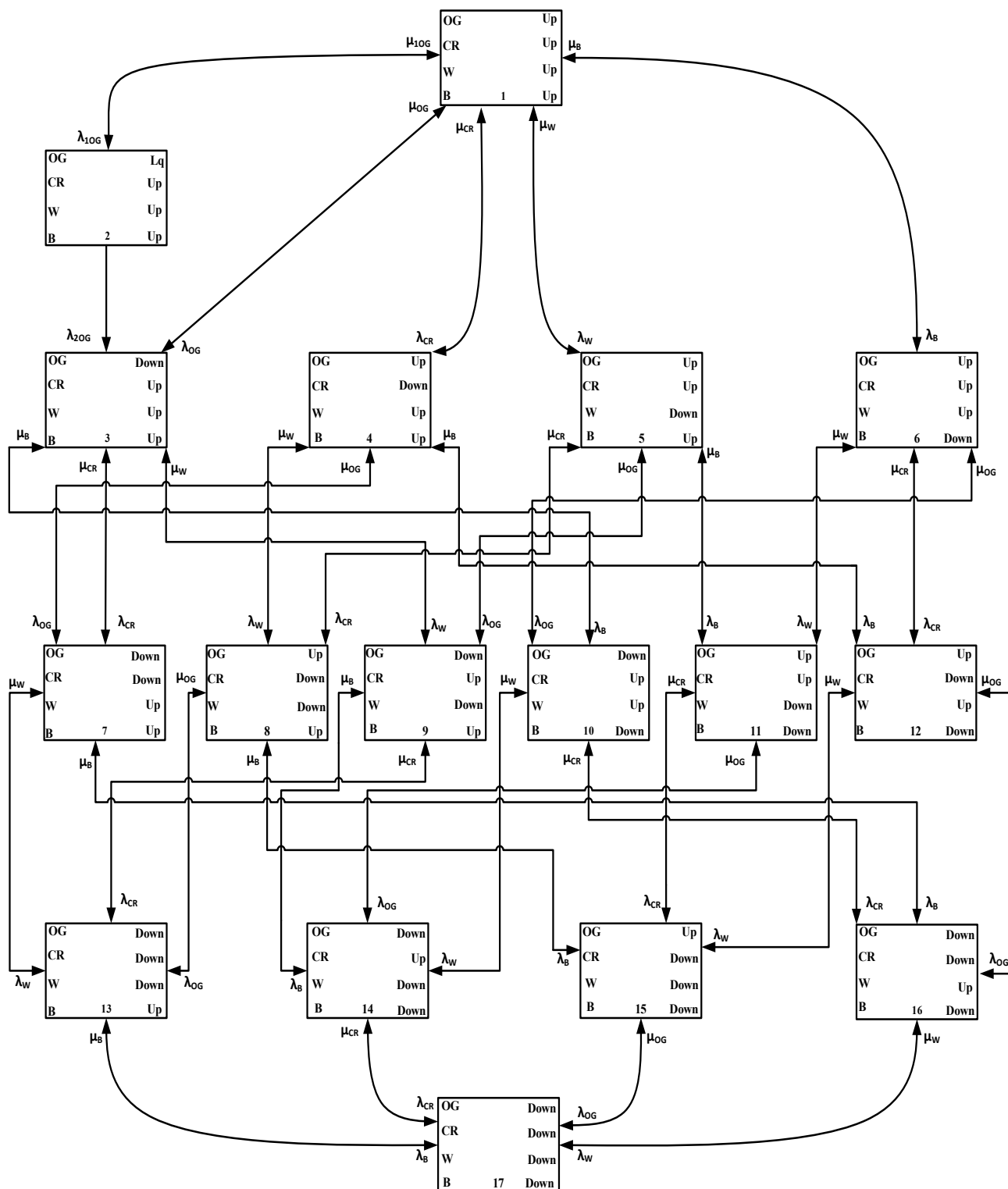
در این قسمت، مدل مارکوف زیربخش هسته ترانسفورماتور جریان ارائه می‌شود. شایان ذکر می‌باشد که با خراب شدن هسته، CT عملکرد خراب را دارد. شکل ۶ نشان‌دهنده مدل مارکوف هسته می‌باشد. در شکل ۶، λ_{CR} و μ_{CR} به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی هسته و نرخ تعمیر آن می‌باشد.



شکل ۶. مدل مارکوف هسته

۳-۴- مدل مارکوف پیشنهادی برای بوشینگ

از آنجا که پدیده شکست عایقی ناشی از بوشینگ فشار قوی می‌تواند باعث از کار افتادن CT شود، بنابراین دو حالت سالم و خراب برای این تجهیز می‌توان در نظر گرفت شکل ۷ مدل مارکوف دو حالت بوشینگ



شکل ۸. مدل مارکوف گسترده ترانسفورماتور جریان

$$\mu_{CT} = \frac{f_{21CT}}{P_{2CT}} = \frac{f_{31} + f_{41} + f_{51} + f_{61}}{P_{2CT}} \quad (21)$$

$$= \frac{\mu_{OG}P_3 + \mu_{CR}P_4 + \mu_W P_5 + \mu_B P_6}{\sum_{i=3}^{17} P_{CTi}}$$

$$\mu_{1CT} = \frac{f_{31CT}}{P_{3CT}} = \frac{f_{21}}{P_{3CT}} = \frac{\mu_{1OG}P_2}{P_2} = \mu_{1OG} \quad (22)$$

۴- مطالعه عددی

در فرایند ارزیابی عملکرد مدل مارکوف پیشنهادی برای قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان محاسبه می‌گردد. در این مرحله، برای ارزیابی قابلیت اطمینان CT، با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مدل مارکوف، اعمال نرخ‌های خرابی و تعمیر به تمامی اجزای CT مطابق جدول ۱ صورت گرفته است. نرخ‌های خرابی و تعمیر معادل محاسبه شده برای مدل نهایی CT در جدول ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که مدل مارکوف پیشنهادی CT در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌گردد. در جدول ۳، نتایج محاسبات احتمال وضعیت‌های مختلف و فرکانس جابه‌جایی مدل مارکوف معادل CT ارائه شده است.

در جدول ۳، احتمال حالت‌های عملکردی CT نشان داده شده در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که بیشترین زمان کارکرد یک CT در حالت سالم و با کیفیت اندازه‌گیری مناسب است که احتمال این وضعیت برابر با ۹۹/۹۷۳۵٪ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که احتمال خرابی CT که بیانگر حالت از کار افتادگی CT می‌باشد، برابر با ۰/۰۰۰۵۴۷۸٪ است. همچنین احتمال کارکرد با کیفیت-کم ترانسفورماتور جریان برابر با ۰/۰۲۵۹٪ می‌باشد که این احتمال بیانگر از کار افتادگی قسمت خنک‌کننده مایع عایق CT می‌باشد.

در نهایت با کمک رابطه‌های (۱۸) الی (۲۲) نرخ‌های خرابی و نرخ خرابی حالت سالم به حالت کیفیت-کم و نرخ خرابی حالت کیفیت-کم به حالت خراب و همچنین نرخ تعمیر CT بدست می‌آید و نتایج آن در جدول ۲ می‌باشد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که نرخ خرابی ترانسفورماتور برابر با ۰/۰۱۵۱٪ می‌باشد و همچنین نرخ تعمیر این تجهیز برابر با ۵۸/۲۷٪ می‌باشد.

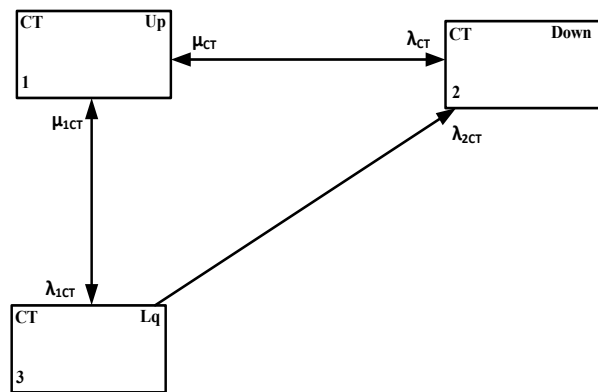
شکل ۹ مدل مارکوف نهایی ترانسفورماتور جریان را نشان می‌دهد که مطابق این شکل سه حالت سالم، خراب و کیفیت-کم برای CT در نظر گرفته شده است. احتمال هر یک از این حالت‌ها مطابق با شکل ۹ به کمک رابطه‌های (۱۵) الی (۱۷) قابل محاسبه است.

$$P_{1CT} = P_1 \quad (15)$$

$$P_{2CT} = \sum_{i=3}^{17} P_i \quad (16)$$

$$P_{3CT} = P_2 \quad (17)$$

در شکل ۹، λ_{CT} ، λ_{1CT} ، λ_{2CT} به ترتیب نشان‌دهنده نرخ خرابی CT، نرخ خرابی از حالت سالم به حالت کیفیت-کم و نرخ خرابی از حالت کیفیت-کم به حالت خرابی CT می‌باشد و همچنین μ_{CT} و μ_{1CT} نرخ تعمیر CT و نرخ تعمیر از حالت کیفیت-کم به حالت سالم می‌باشد.



شکل ۹. مدل مارکوف معادل ترانسفورماتور جریان

رابطه‌های (۱۸) الی (۲۲) برای محاسبه نرخ‌های خرابی و تعمیر معادل CT مطابق شکل ۹ تعریف می‌شوند.

$$\lambda_{CT} = \frac{f_{12CT}}{P_{1CT}} = \frac{f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16}}{P_1} \quad (18)$$

$$= \frac{\lambda_{OG}P_1 + \lambda_{CR}P_1 + \lambda_W P_1 + \lambda_B P_1}{P_1}$$

$$= \lambda_{OG} + \lambda_{CR} + \lambda_W + \lambda_B$$

$$\lambda_{1CT} = \frac{f_{13CT}}{P_{1CT}} = \frac{f_{12}}{P_1} = \frac{\lambda_{1OG}P_1}{P_1} = \lambda_{1OG} \quad (19)$$

$$\lambda_{2CT} = \frac{f_{32CT}}{P_{3CT}} = \frac{f_{23}}{P_2} = \frac{\lambda_{2OG}P_2}{P_2} = \lambda_{2OG} \quad (20)$$

۵- نتیجه گیری

ترانسفورماتورهای جریان نقش اساسی در تأمین سیگنال جریان برای سیستم‌های اندازه‌گیری، کنترل و حفاظت دارند. پایش وضعیت این تجهیزات در طول عمر آن‌ها به منظور عملکرد مناسب سیستم حفاظت از اهمیت بالایی برخوردار است. ارائه مدل‌های دقیق و مطابق با شرایط عملیاتی، از جمله چالش‌های مهم در ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات محسوب می‌شود. در این مقاله یک مدل مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور جریان به عنوان یکی از تجهیزات مهم اندازه‌گیری و حفاظت پیشنهاد شده است. برای استخراج مدل مارکوف پیشنهادی، در ابتدا، برای هر یک از زیربخش‌های CT یک مدل مارکوف ارائه شد و سپس با تلفیق مدل‌های مارکوف حاصل، یک مدل ۱۷ حالتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کارایی مطلوب روش پیشنهادی در ارزیابی قابلیت اطمینان CT دارد و نشان می‌دهد که ترانسفورماتور جریان در بیش از ۹۹٪ طول عمر خود، در حالت سالم و با کیفیت اندازه‌گیری مناسب است.

مراجع

- [1] R. Billinton, and R. N. Allan, "Reliability evaluation of engineering systems," Springer, 1992.
- [2] S. R. Palakodeti, H. Guo, and P. Raju, "Reliability modeling and simulation of electric substations—a case study," *Applications of Modelling and Simulation*, vol. 5, pp. 35-43, 2021.
- [3] Y. Wang, W. Li, and J. Lu, "Reliability analysis of wide-area measurement system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1483-1491, 2010.
- [4] M. Šnipas, V. Radziukynas, and E. Valakevičius, "Modeling reliability of power systems substations by using stochastic automata networks," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 157, pp. 13-22, 2017.
- [5] C. Murthy, A. Mishra, D. Ghosh, D. S. Roy, and D. K. Mohanta, "Reliability analysis of phasor measurement unit using hidden Markov model," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1293-1301, 2014.
- [6] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, and T. Sidhu, "Determination of the optimum routine test and

جدول ۱. داده‌های ورودی ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور

جریان [۱۹] و [۱۴]	
عناصر تشکیل دهنده	نرخ (خرابی/سال) یا (تعمیر/سال)
λ_{Oil}	۰/۰۰۳
μ_{Oil}	۲۳
λ_{GC}	۰/۰۰۱
μ_{GC}	۱۸۲/۵
$\mu_{O\&G}$	۲۰/۴۲
λ_{Core}	۰/۰۰۵
μ_{Core}	۱۹
λ_W	۰/۰۰۸۶۱
μ_W	۱۰۰
λ_B	۰/۰۰۳
μ_B	۱۸۲/۵

جدول ۲. نرخ‌های خرابی و تعمیر ترانسفورماتور جریان

نرخ خرابی (مقدار خرابی / سال) عناصر	نرخ تعمیر (مقدار تعمیر / سال) عناصر
λ_{OG}	۰/۰۰۳
λ_{1OG}	۰/۰۰۱
λ_{2OG}	۰/۰۰۳
λ_{CT}	۰/۰۱۵۱
λ_{1CT}	۰/۰۰۱
λ_{2CT}	۰/۰۰۳
μ_{1OG}	۱۸۲/۵
μ_{OG}	۲۲/۹۸
μ_{1CT}	۱۸۲/۵
μ_{CT}	۵۸/۲۷

جدول ۳. احتمال حالت‌های ترانسفورماتور جریان و فرکانس جابه‌جایی

حالت‌ها			
مقدار (سال)	فرکانس جابه‌جایی	مقدار (درصد)	احتمال کارکرد
۰/۰۱۵۱	F _{12CT}	۹۹/۹۷۳۵	P _{1CT}
۰/۰۱۵۱	F _{21CT}	۰/۰۰۰۵۴۷۸	P _{2CT}
۰/۰۰۰۱	F _{13CT}	۰/۰۲۵۹	P _{3CT}
۰/۰۰۰۹۹۹۷	F _{31CT}		
۰/۰۰۰۰۱۶۴۲	F _{32CT}		

- Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 4, pp. e12272, 2020.
- [13] M. Sefidgaran, M. Mirzaei, and A. Ebrahimzadeh, "Reliability model of power transformer with ONAN cooling," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 103-109, 2010.
- [14] M. Sefidgaran, M. Mirzaei, and A. Ebrahimzadeh, "Reliability model of the power transformer with ONAF cooling," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 97-104, 2012.
- [15] O. Haghgoo, and Y. Damchi, "Reliability modelling of capacitor voltage transformer using proposed Markov model," *Electric Power Systems Research*, vol. 202, pp. 107573, 2022.
- [16] M. Yazdani-Asrami, M. Taghipour-Gorjilaie, S. M. Razavi, and S. A. Gholamian, "A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 1129-1140, 2015.
- [17] ABB, "Oil insulated outdoor instrument transformers buyer's guide," 2012-09.
- [18] I. Standard, "60044-1 Current transformer," IEC.
- [19] P. Hale, and R. G. Arno, "Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation, and HVAC components for commercial, industrial, and utility installations," In *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical*, pp. 31-54, 2000.
- self-checking intervals in protective relaying using a reliability model," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 17, no. 3, pp. 663-669, 2002.
- [7] A. H. Etemadi, and M. Fotuhi-Firuzabad, "New considerations in modern protection system quantitative reliability assessment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2213-2222, 2010.
- [8] Y. Damchi, and J. Sadeh, "Determination of the optimum routine and self-checking test time intervals for power system protection considering remote back-up protection system failure," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, no. 10, pp. 1163-1171, 2013.
- [9] A. Karami-Horestani, M. E. H. Golshan, and H. Hajian-Hoseinabadi, "Reliability modeling of TCR-FC type SVC using Markov process," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 305-311, 2014.
- [10] S. Zhao, X. Yan, B. Wang, E. Wang, and L. Ma, "Research on reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model," *Electric Power Systems Research*, vol. 173, pp. 1-5, 2019.
- [11] A. Mirsamadi, Y. Damchi, and M. Assili, "Impact of human error modeling on failure rate and optimum routine test interval of protection system," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 1734-1743, 2021.
- [12] A. Karimabadi, M. E. Hajiabadi, E. Kamyab, and A. A. Shojaei, "Determining the optimal inspection rate of circuit breakers equipped with condition monitoring devices using new maintenance Markov model," *International*

³ Oil Natural Air Forced

¹ Current Transformer

² Oil Natural Air Natural