

لحاظ نمودن سیستم حفاظت پشتیبان در تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی

جواد ساده
استادیار گروه برق
sadeh@um.ac.ir

یاسر دامچی
دانشجوی کارشناسی ارشد برق - قدرت
damchi_pe@yahoo.com

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، مشهد، ایران

چکیده - عملکرد مناسب سیستم حفاظتی برای داشتن قابلیت اطمینان مطلوب در شبکه قدرت، لازم می‌باشد. برای داشتن عملکرد مناسب سیستم حفاظتی انجام تست دوره‌ای، ضروری است. تعیین دقیق زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی برای داشتن حداکثر احتمال دسترسی به سیستم حفاظتی و حداقل عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات سیستم حفاظتی شبکه قدرت دارد. در بیشتر مطالعات قبلی که برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی انجام شده، سیستم حفاظت پشتیبان کاملاً قابل اطمینان فرض شده است. ولی در نظر گرفتن چنین فرضی در عمل چندان درست نمی‌باشد، چرا که ساختار سیستم حفاظت پشتیبان معمولاً همانند سیستم حفاظت اصلی است. بنابراین برای سیستم حفاظت پشتیبان احتمال خرابی، احتمال عملکرد ناجا و احتمال عدم عملکرد در مدت زمان انجام وظیفه‌اش در سیستم قدرت وجود دارد. بنابراین در این مقاله یک مدل مارکوف توسعه یافته، برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای سیستم حفاظت پشتیبان ارائه شده است. برای تحلیل قابلیت اطمینان از شاخص‌های قابلیت اتکا، عدم دسترسی و عدم دسترسی غیر عادی به سیستم حفاظتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سیستم حفاظت پشتیبان در تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، قابل ملاحظه است.

کلید واژه- زمان بهینه تست دوره‌ای، سیستم حفاظت اصلی، سیستم حفاظت پشتیبان، قابلیت اطمینان

۱- مقدمه

حفاظتی می‌تواند برای کاهش چنین حوادثی، بسیار مؤثر باشد. بنابراین برای حداکثر کردن دسترسی به سیستم حفاظتی و حداقل نمودن عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی، انجام تست دوره‌ای لازم و ضروری است [۴]. مطالعات زیادی در زمینه تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی انجام شده است. مرجع [۴] زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی را در شرایطی که فقط امکان تست خودبازبینی وجود دارد و احتمال خرابی سیستم حفاظت پشتیبان صفر می‌باشد، تعیین کرده و هم چنین تأثیر رله‌های قدیمی و دیجیتالی را بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای، مورد ارزیابی قرار داده است. در مرجع [۵] زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی بدون در نظر گرفتن تسهیلات خودبازبینی^۲ و مانیتورینگ و با فرض اینکه رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان می‌باشد، تعیین شده است. مرجع

امروزه با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و گسترش شبکه قدرت، عملکرد نامطلوب سیستم قدرت می‌تواند اثرات نامطلوبی بر اقتصاد هر کشوری داشته باشد. سیستم‌های حفاظتی نقش حیاتی در حفظ قابلیت اطمینان سرویس‌دهی به مصرف‌کنندگان در سطح بالا دارند [۱]. خرابی سیستم‌های حفاظتی دلیل اصلی خروجی‌های متوالی در شبکه قدرت است [۲]. در مطالعه‌ای که توسط موسسه^۱ NERC انجام شده، بیان شده است که سیستم‌های حفاظتی در بروز حدود ۷۵ درصد از اغتشاشات اصلی دخیل هستند. به طور مثال می‌توان از خاموشی شمال آمریکا در نوامبر ۱۹۶۵ و یا از خاموشی گسترده نیویورک در جولای ۱۹۹۷ و ناپایداری سیستم آیداهوی جنوبی که در دسامبر ۱۹۹۵ رخ داده‌اند، نام برد [۳]. عملکرد مناسب سیستم

² Self-checking

¹ North American Electric Reliability Council

۲- تحلیل قابلیت اطمینان

برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی از مدل مارکوفی شکل ۱ که برای سیستم حفاظتی خط انتقال ارائه شده، استفاده شده است. در مدل مارکوف پیشنهادی وجود احتمال خرابی برای سیستم حفاظت پشتیبان لحاظ شده است. در مدل پیشنهادی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- فقط امکان تست خودبازبینی وجود دارد.

۲- رله اصلی و پشتیبان، در مدت زمان تست دوره‌ای خارج از سرویس هستند.

۳- انجام بازدید و یا وقوع خطا برای مشخص کردن خرابی سیستم حفاظتی لازم است.

۴- بررسی سیستم حفاظتی، همیشه خرابی‌ها را مشخص می‌کند و خود سبب خرابی نمی‌شود.

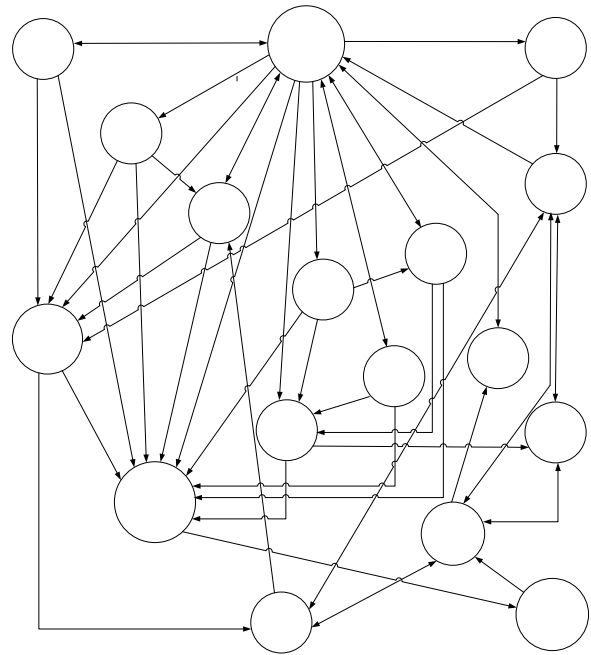
۵- زمان مورد نیاز برای تست سیستم حفاظتی، برابر مدت زمان لازم برای تعمیر و یا جایگزینی سیستم حفاظتی خراب شده می‌باشد.

۶- امکان تعمیر همزمان سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان وجود دارد.

در شکل ۱ در حالت ۱ سیستم در شرایط نرمال است، در این حالت عنصر حفاظت‌شونده برق دار و رله اصلی و پشتیبان در شرایط سالم هستند. وقتی خطایی روی خط اتفاق بیفتد، مدل به حالت ۲ انتقال می‌یابد و با عملکرد سیستم حفاظت اصلی، سیستم حفاظت‌شونده جدا شده و مدل به حالت ۹ می‌رود. در حالت ۹ خط معیوب شده، تعمیر و دوباره برق‌دار می‌شود و مدل به حالت ۱ برمی‌گردد. در حالت ۳ سیستم حفاظت اصلی و در حالت ۸ سیستم حفاظت پشتیبان مورد بررسی دوره‌ای قرار می‌گیرند. هر گاه خرابی سیستم‌های حفاظتی توسط تست خودبازبینی مشخص شود مدل برای سیستم حفاظت اصلی به حالت ۵ منتقل و برای حفاظت پشتیبان به حالت ۷ منتقل می‌شود. ولی اگر خرابی سیستم‌های حفاظتی توسط تست خودبازبینی مشخص نشود مدل برای سیستم حفاظت اصلی به حالت ۴ و برای حفاظت پشتیبان به حالت ۶ منتقل می‌شود. در حالت ۱۰ سیستم حفاظت اصلی و عنصر حفاظت‌شونده دچار خرابی شده و مدل با عملکرد حفاظت پشتیبان به حالت ۱۲ منتقل می‌شود. در حالت ۱۱ حفاظت پشتیبان و عنصر حفاظت‌شونده دچار خرابی شده و مدل با عملکرد حفاظت اصلی به حالت ۱۳ منتقل می‌شود. چنانچه در حالت ۱۰ سیستم حفاظت پشتیبان و در حالت ۱۱ سیستم حفاظت اصلی دچار خرابی شوند مدل به

[۶] تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی یک سیستم انتقال را با در نظر گرفتن افزونگی انجام داده و در تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای، برای رله پشتیبان احتمال خرابی در نظر نگرفته است. در مرجع [۷] تغییرات هزینه نگهداری را با توجه به فرکانس انجام نگهداری و با در نظر گرفتن تأثیر حفاظت اصلی و پشتیبان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۸] تحلیل قابلیت اطمینان برای چندین ساختار رله اضافه جریان به همراه یک عنصر حفاظت شونده، صرفاً با در نظر گرفتن تست خودبازبینی و با فرض اینکه رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان است، انجام شده است. مرجع [۹] زمان زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال را با در نظر گرفتن شاخص‌های تأثیرپذیری متفاوت برای تسهیلات خودبازبینی و مانیتورینگ مشخص نموده است و همچنین زمان بهینه تست خودبازبینی سیستم حفاظتی را تعیین نموده است البته در این مرجع رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان فرض شده است. مرجع [۱۰] زمان بهینه تست دوره‌ای و زمان بهینه تست خودبازبینی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور را در صورتی که امکان تست خودبازبینی و تست مانیتورینگ وجود دارد و با فرض اینکه رله پشتیبان صد در صد قابل اطمینان می‌باشد، تعیین نموده است. در مرجع [۱۱] شاخصی تحت عنوان متوسط ضرر اقتصادی سالیانه برای سیستم حفاظتی ارائه شده است و زمان بهینه تست نگهداری دوره‌ای سیستم حفاظتی را با استفاده از فرآیند نیمه مارکوفی با در نظر گرفتن تست خودبازبینی و بدون لحاظ کردن احتمال خرابی برای سیستم حفاظت پشتیبان، تعیین نموده است. در مرجع [۱۱] که توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است، زمان بهینه تست دوره‌ای با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای حفاظت پشتیبان و امکان تست خودبازبینی تعیین گردیده و فرض شده است که سیستم حفاظت پشتیبان از نظر زمانی پس از سیستم حفاظت اصلی تحت تست دوره‌ای قرار می‌گیرد.

در این مقاله زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای حفاظت پشتیبان و با فرض اینکه سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان می‌توانند به طور همزمان تحت تست دوره‌ای قرار بگیرند، تعیین شده است. همچنین تأثیر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی و نرخ خرابی سیستم حفاظت پشتیبان بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سیستم حفاظت پشتیبان در تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، قابل ملاحظه است.



شکل ۱: مدل مارکوف سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت

حالت ۱۵ منتقل می‌شود و با عملکرد سیستم حفاظت پشتیبان لایه دوم، عنصر تحت حفاظت و عنصر اضافی از شبکه جدا شده و مدل به حالت ۱۷ منتقل می‌شود و با جداسازی دستی عنصر اضافی مدل به حالت ۱۴ منتقل شده و پس از تعمیر عنصر تحت حفاظت مدل به حالت ۱۶ انتقال می‌یابد.

واژگان اختصاری و نرخ‌های گذر موجود در مدل به صورت

زیر تعریف می‌شوند:

C: عنصر حفاظت‌شونده،

P: سیستم حفاظت اصلی،

B: سیستم حفاظت پشتیبان،

X: تجهیزات اضافی همراه با عنصر حفاظت‌شونده که به صورت دستی از شبکه جدا می‌شوند،

F_{bp} و F_p : نرخ خرابی سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان (معکوس متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌ها برای سیستم‌های حفاظتی)،

F_{bST} و F_{ST} : نرخ خرابی مشخص شده سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان مشخص شده توسط تست خودبازبینی،

F_{bpp} و F_{pp} : نرخ خرابی سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان مشخص نشده توسط تست خودبازبینی

F_c : نرخ خرابی عنصر حفاظت‌شونده (خرابی بر واحد ساعت)،

F_{cc} : نرخ خرابی مشترک سیستم حفاظت اصلی و عنصر حفاظت‌شونده (خرابی بر واحد ساعت)،

F_{bcc} : نرخ خرابی مشترک سیستم حفاظت پشتیبان و عنصر حفاظت‌شونده (خرابی بر واحد ساعت)،

F_{ccc} : نرخ خرابی مشترک سیستم حفاظت اصلی، پشتیبان و

عنصر حفاظت‌شونده (خرابی بر واحد ساعت)،

ST_p و ST_b : شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان،

R_c : نرخ تعمیر عنصر حفاظت‌شونده (تعمیر بر واحد ساعت)،

R_t و R_{bt} : نرخ بازرسی سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان (بازرسی بر واحد ساعت)،

R_r و R_{br} : نرخ تعمیر سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان (تعمیر بر واحد ساعت)،

R_{bp} : نرخ تعمیر همزمان سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان (تعمیر بر واحد ساعت)،

S_n و S_{bn} : عملکرد تریپ نرمال سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان بر ساعت (معکوس زمان رفع خطا با سیستم‌های حفاظتی)،

S_b : عملکرد تریپ نرمال سیستم حفاظت پشتیبان دوم بر ساعت (معکوس زمان رفع خطا با سیستم حفاظت پشتیبان دوم)،

S_m : جداسازی دستی بر ساعت،

θ_{pm} و θ_{bpm} : نرخ تست دوره‌ای سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان (معکوس فاصله زمانی بررسی سیستم‌های حفاظتی).

پارامترهای F_{bST} ، F_{ST} ، F_{pp} و F_{bpp} در معادله (۱) تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} F_{ST} &= F_p \times ST_p \\ F_{pp} &= F_p \times (1 - ST_p) \\ F_{bST} &= F_{bp} \times ST_b \\ F_{bpp} &= F_{bp} \times (1 - ST_b) \end{aligned} \quad (1)$$

برای تحلیل قابلیت اطمینان، احتمال مربوط به حالت‌های متفاوت در مدل مارکوف توسط معادله (۲) محاسبه شده است. در این رابطه P ماتریس گذار حالت مدل مارکوف و p بردار احتمال حالت‌های مدل است [۱۲]:

$$\begin{aligned} pP &= p \\ p &= [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{15}, p_{16}, p_{17}] \end{aligned} \quad (2)$$

دستگاه معادلات تشکیل شده در رابطه (۲) وابسته خطی هستند، لذا برای محاسبه احتمال حالت‌ها نیاز به معادله کمکی است که در معادله (۳) تعریف شده است:

$$\sum_{i=1}^{17} p_i = 1 \quad (3)$$

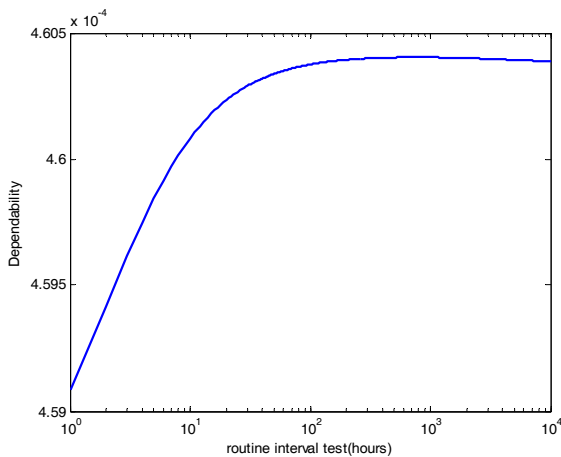
برای تحلیل قابلیت اطمینان از شاخص‌های قابلیت اتکا^۱، عدم دسترسی^۲ و عدم دسترسی غیرعادی^۳ به سیستم حفاظتی

¹ Dependability index

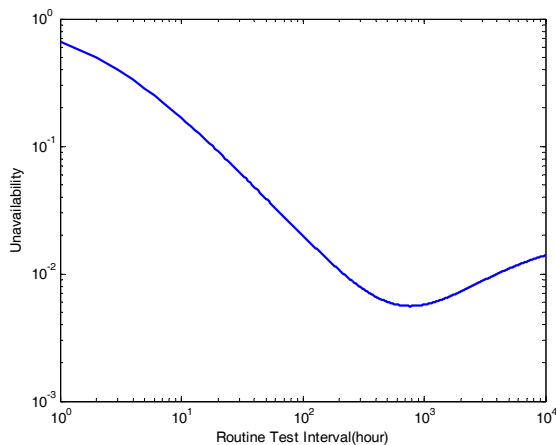
² Unavailability index

³ Abnormal unavailability index

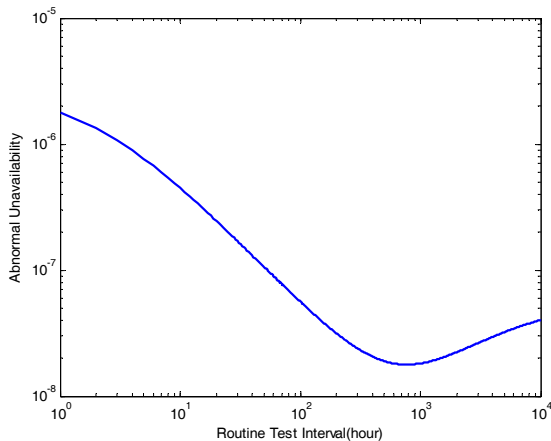
شاخص عدم دسترسی برابر 0.05567 و مقدار شاخص عدم دسترسی غیرعادی برابر 1.779873×10^{-8} شده است.



شکل ۲: قابلیت اتکا به سیستم حفاظتی



شکل ۳: عدم دسترسی به سیستم حفاظتی



شکل ۴: عدم دسترسی غیر عادی به سیستم حفاظتی

۳-۲- تأثیر تست خودبازبینی سیستم حفاظت پشتیبان بر روی زمان بهینه تست دوره ای

برای بررسی تأثیر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی سیستم حفاظت پشتیبان بر روی زمان بهینه تست دوره ای سیستم حفاظتی، شاخص های قابلیت اتکا، عدم دسترسی غیر

استفاده شده است. شاخص قابلیت اتکا (P_D) نشان دهنده احتمال عملکرد صحیح سیستم حفاظتی در هنگامی که مورد نیاز است، می باشد [۹]. شاخص عدم دسترسی به سیستم حفاظتی (P_{Un}) به عنوان احتمال اینکه سیستم حفاظتی خارج از سرویس باشد در حالی که سیستم برق دار است. شاخص عدم دسترسی غیرعادی به سیستم حفاظتی (P_{Aun}) به عنوان احتمال اینکه سیستم حفاظتی خارج از سرویس باشد در حالی که خطائی در سیستم رخ داده است [۴]. با توجه به مدل پیشنهادی، شاخص های مذکور به کمک معادلات (۴) محاسبه می شوند

$$P_D = p_2 + p_9 + p_{10} + p_{11} + p_{12} + p_{13}$$

$$P_{Un} = p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_{16} \quad (4)$$

$$P_{Aun} = p_{14} + p_{15} + p_{17}$$

۳- شبیه سازی

برای تحلیل قابلیت اطمینان از نرخ های گذر زیر استفاده شده است [۴]:

$R_c=0.5$ (repairs per hour)	$F_{bcc}=10^{-6}$ (failures per hour)
$R_t=1$ (test per hour)	$F_{bp}=10^{-6}$ (failures per hour)
$R_{bt}=1$ (test per hour)	$F_{ccc}=10^{-9}$ (failures per hour)
$R_r=0.5$ (repairs per hour)	$S_n=43200$ (operation per hour)
$R_{rt}=0.5$ (repairs per hour)	$S_{bn}=21600$ (operation per hour)
$R_{rp}=0.5$ (repairs per hour)	$S_b=14400$ (operation per hour)
$F_{cc}=10^{-6}$ (failures per hour)	$S_m=0.5$ (operation per hour)

نتایج زیر از مطالعه انجام شده حاصل شده است.

۳-۱- حالت پایه

در این مطالعه برای مقایسه تأثیر خرابی سیستم حفاظت پشتیبان بر روی زمان بهینه تست دوره ای سیستم حفاظتی و شاخص های قابلیت اطمینان، یک حالت به عنوان حالت پایه تعریف شده است. در این حالت فرض شده است که امکان تست خودبازبینی برای سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان وجود ندارد و همچنین متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی برای سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان برابر ۵۰ سال می باشد. خرابی عنصر حفاظت شونده برابر ۲ خرابی بر واحد سال لحاظ شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل های ۲ تا ۴ زمان بهینه تست دوره ای سیستم حفاظتی برابر ۷۸۰ ساعت می باشد چرا که شاخص قابلیت اتکا دارای حداکثر مقدار خود و شاخص های عدم دسترسی غیر عادی و عدم دسترسی به سیستم حفاظتی دارای حداقل مقدار خود در زمان ۷۸۰ ساعت می باشند. در زمان بهینه فوق مقدار شاخص قابلیت اتکا برابر $4/604042 \times 10^{-4}$ ، مقدار

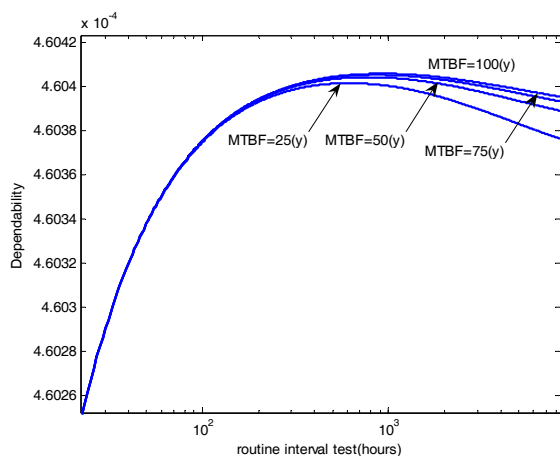
شکل‌های ۵ تا ۷ و جدول ۱ نشان می‌دهند که با انتخاب مقدار شاخص تأثیرپذیری ۹۰ درصد برای تست خودبازبینی حفاظت اصلی و با افزایش شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی حفاظت پشتیبان از صفر درصد به ۹۰ درصد، زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ۳/۶ برابر می‌شود. هم‌چنین شاخص‌های عدم دسترسی و عدم دسترسی غیرعادی به سیستم حفاظتی به ترتیب به مقدار ۶۳/۶٪ و ۴۹/۸٪ کاهش می‌یابند و تغییر شاخص قابلیت اتکا قابل ملاحظه نیست. البته قابل ذکر است که در صورتی که شاخص تأثیرپذیری حفاظت اصلی و پشتیبان صد در صد باشند، زمان بهینه تست دوره‌ای بی‌نهایت می‌شود و این به مفهوم آن است که نیاز به انجام تست دوره‌ای نمی‌باشد.

جدول ۱: تغییرات شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی

ST _p (%)	ST _b (%)	P _D	P _{Un}	P _{Aun}	Optimum Time(h)
0	0	4.604042e-04	0.005565	1.779873e-08	780
90	0	4.604073e-04	0.004020	1.367891e-08	1122
90	50	4.604097e-04	0.002856	1.057967e-08	1672
90	90	4.604124e-04	0.001463	6.870083e-09	4025
100	100	-	-	-	10000

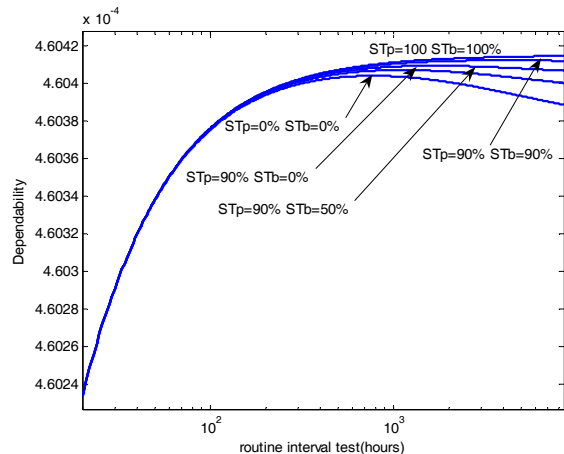
۳-۳- تأثیر نرخ خرابی سیستم حفاظت پشتیبان بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای

در این بخش زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت برای متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های سیستم حفاظت پشتیبان، تعیین شده است. برای انجام تحلیل قابلیت اطمینان فرض شده است تست خودبازبینی برای سیستم حفاظت اصلی و پشتیبان وجود نداشته و پارامترها مشابه حالت‌های قبل انتخاب شده‌اند. نتایج در شکل ۸ تا ۱۰ و جدول ۲ ارائه شده است.

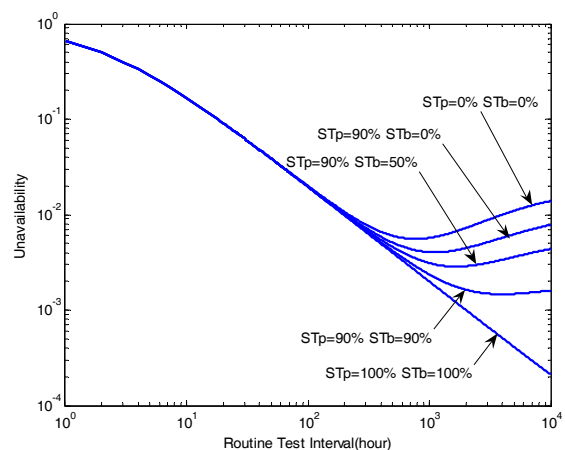


شکل ۸: تغییرات قابلیت اتکا به سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی

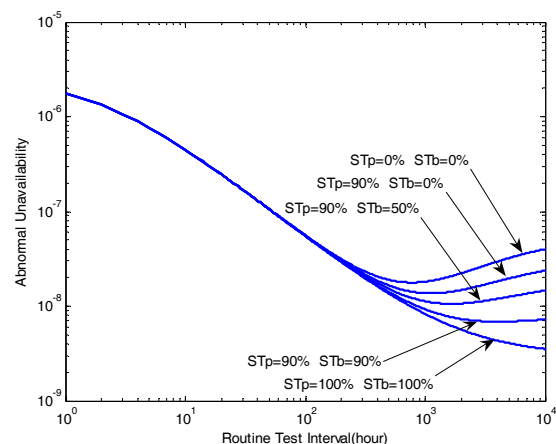
عادی و عدم دسترسی به سیستم حفاظتی برای شاخص‌های تأثیرپذیری متفاوت تست خودبازبینی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. سایر پارامترها مشابه حالت قبلی هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۵ تا ۷ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۵: تغییرات قابلیت اتکا به سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی



شکل ۶: تغییرات احتمال عدم دسترسی به سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی



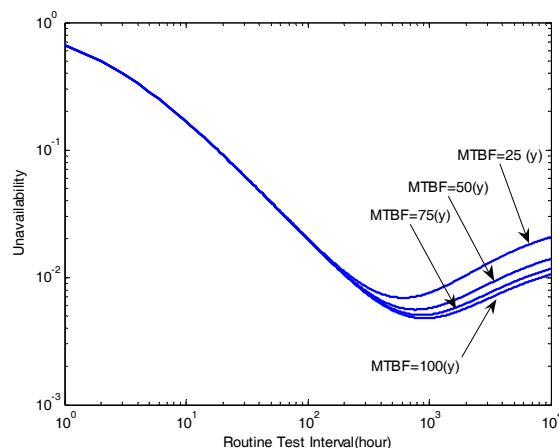
شکل ۷: تغییرات احتمال عدم دسترسی غیر عادی به سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی

۴- نتیجه گیری

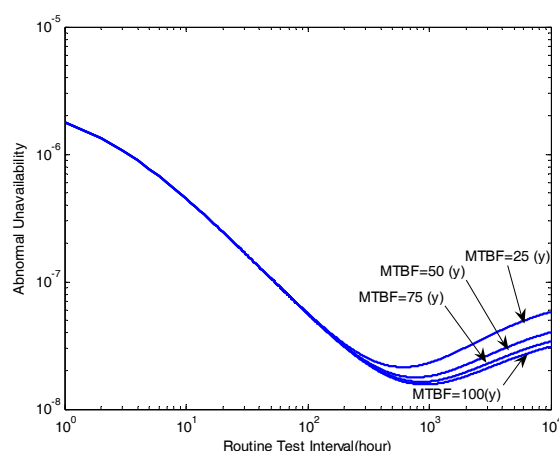
در این مقاله برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، یک مدل مارکوف توسعه یافته با در نظر گرفتن تأثیر سیستم حفاظت پشتیبان و تست خودبازبینی برای سیستم‌های حفاظتی، ارائه شده است. همچنین چگونگی تغییر زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی و نرخ خرابی سیستم حفاظت پشتیبان مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، حاکی از آن است که با افزایش شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی و فاصله متوسط بین خرابی‌های سیستم حفاظت پشتیبان، زمان بهینه تست دوره‌ای به ترتیب $3/6$ و $1/5$ برابر افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج فوق در نظر گرفتن احتمال خرابی برای سیستم حفاظت پشتیبان در تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1] L. Wang, G. Wang and Z. Sun, "Determination of the Optimum Routine Maintenance Intervals for Protective Systems," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, July 2009.
- [2] K. Mazlumi and H.A. Abyaneh, "Relay Coordination and Protection Failure Effects on Reliability Indices in an Interconnected Sub-Transmission System," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 7, pp. 1011-1017, July 2009.
- [3] X. Yu and C. Singh, "Power System Reliability Analysis Considering Protection Failures," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 963-968, July 2002.
- [4] J.J. Kumm, M.S. Weber, D. Hou and E.O. Schweitzer, "Predicting the Optimum Routine Test Interval for Protection Relays," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 659-665, April 1995.
- [5] P.M. Anderson and S.K. Agarwal, "An Improved Model for Protective System Reliability," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. 41, No. 3, pp. 422-426, Sep. 1992.
- [6] P.M. Anderson, G.M. Chintaluri, S.M. Magbuhat and R.F. Ghajar, "An Improved Reliability Model for Redundant Protective Systems Markov Models," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 573-578, May 1997.
- [7] S.T.J.A. Vermeulen, H. Rijanto and F.A.D. Schouten, "Modeling the Influence of Preventive Maintenance on Protection System Reliability Performance," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998.
- [8] K. Kangvansaichol, P. Pittayapat and B. Eua-arporn, "Routine Test Interval Decision for Protective Systems Based on Probabilistic Approach," *IEEE Power System Technology Conference*, pp. 977-988, Aug. 2000.
- [9] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad and T.S. Sidhu, "Determination of the Optimum Routine Test and Self-checking Intervals in Protective Relaying Using a Reliability Model," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, pp. 663-669, Aug. 2002.
- [10] H. Seyedi, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Sanaye-Pasand, "An Extended Markov Model to Determine the Reliability of Protective System," *IEEE Power India Conference*, April 2006.
- [11] Y. Damchi and J. Sadeh, "Considering Failure Probability for Back-up Relay in Determination of the Optimum Routine Test Interval in Protective System Using Markov Model," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, July 2009.
- [12] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*. New-York: Plenum, 1994.



شکل ۹: تغییرات احتمال عدم دسترسی و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با تغییر متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های حفاظت پشتیبان



شکل ۱۰: تغییرات احتمال عدم دسترسی غیر عادی و زمان بهینه تست سیستم حفاظتی دوره‌ای با تغییر متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های حفاظت پشتیبان

نتایج شکل‌های ۸ تا ۱۰ و جدول ۲ حاکی از آن است که با افزایش متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های حفاظت پشتیبان از ۲۵ سال به ۱۰۰ سال، زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی $1/5$ برابر شده است. همچنین شاخص‌های عدم دسترسی و عدم دسترسی غیر عادی به سیستم حفاظتی به ترتیب به اندازه $31/1\%$ و $26/8\%$ کاهش می‌یابند. البته قابل ذکر است که با توجه به جداول ۱ و ۲ حساسیت فاصله زمانی بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی به تغییر شاخص تأثیرپذیری تست خودبازبینی حفاظت پشتیبان بیشتر از تغییر فاصله زمانی متوسط بین خرابی‌های سیستم حفاظت پشتیبان است.

جدول ۲: تغییرات شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای با تغییر متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های سیستم حفاظت پشتیبان

MTBF(y) Back-up	P_D	P_{Un}	P_{Aun}	Optimum Time(h)
25	4.604016e-04	0.006911	2.138772e-08	617
50	4.604042e-04	0.005566	1.779873e-08	780
75	4.604053e-04	0.005044	1.640569e-08	870
100	4.604059e-04	0.004763	1.565634e-08	927