

آنالیز تأثیر نرخ خرابی رله پشتیبان بر زمان تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با استفاده از مدل درخت حوادث

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

یاسر دامچی
دانشجوی کارشناسی ارشد برق-قدرت
damchi_pe@yahoo.com
دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

چکیده - تعیین دقیق زمان بهینه تست دوره‌ای برای داشتن قابلیت اطمینان مطلوب نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات سیستم حفاظتی دارد. عملکرد نابجا و یا عدم عملکرد رله پشتیبان در صورت عمل نکردن رله اصلی برای رفع خطا، می‌تواند منجر به خروجی‌های متوالی شده و در نهایت خاموشی گسترده شبکه را به همراه داشته باشد. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این مقاله با در نظر گرفتن احتمال خرابی رله پشتیبان آنالیز قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با استفاده از درخت حوادث انجام شده است. قابلیت دسترسی و عدم قابلیت دسترسی به سیستم حفاظتی با زمان تست دوره‌ای مشخص، در حالتی که رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان است با حالتی احتمال خرابی برای رله پشتیبان وجود دارد مقایسه شده است و همچنین زمان تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان برای داشتن قابلیت اطمینان مطلوب تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ خرابی رله پشتیبان قابلیت دسترسی و زمان تست دوره‌ای کاهش می‌یابد که این امر افزایش هزینه تست دوره‌ای را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی- سیستم حفاظت، تست دوره‌ای، قابلیت اطمینان، رله پشتیبان

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های حفاظتی نقش حیاتی در افزایش قابلیت اطمینان سرویس‌دهی مورد نیاز در سیستم قدرت را دارند [۱]. دو مشخصه مهم برای سیستم حفاظتی از دیدگاه قابلیت اطمینان، قابلیت اتکا^۱ و امنیت^۲ است [۱-۳]. هر سیستم حفاظتی برای داشتن ماکزیمم احتمال دسترسی و مینیمم کردن عملکرد اشتباه، باید تحت تست دوره‌ای قرار بگیرد [۴،۵]. مطالعات نشان می‌دهد که سیستم حفاظتی نقش ویژه‌ای در انتشار اغتشاشات در سیستم قدرت دارد به طوری که می‌تواند سبب خاموشی گسترده سیستم قدرت شود [۶]. به عنوان مثال خاموشی گسترده‌ای که در شبکه WSCC در ۱۰ اگوست سال

۱۹۹۶ در اثر یک تریپ اشتباه رخ داده است، سبب از دست رفتن ۲۷۰۰۰ مگاوات برق تولیدی، ۳۰۰۰۰ مگاوات بار مصرفی و قطع برق ۷/۵ میلیون نفر شده است [۷-۹]. آنالیز قابلیت اطمینان برای سیستم حفاظتی در مقالات زیادی انجام شده است. در [۱،۲] زمان بهینه تست دوره‌ای با در نظر گرفتن امکان تست خودبازبینی^۳ و مانیتورینگ^۴ برای سیستم حفاظتی و عنصر حفاظت شونده با استفاده از مدل مارکوف تعیین شده است. در [۱۰] روش درخت حوادث برای مطالعه تأثیر سیستم حفاظتی بر روی قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده است. در [۱۱] تأثیر تعمیرات پیشگیرانه و خرابی سیستم حفاظتی در خرابی

³ -Self checking

⁴ - Monitoring

¹ - Dependability

² -Security

اجزای هر سیستم حفاظتی که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل: واحد تشخیص‌دهنده خطا (FD)، که از قسمت‌های مختلفی چون، مقایسه‌کننده، ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان تشکیل شده‌است. واحد رله (R) از سیم پیچ‌های عمل‌کننده و بازدارنده، مدار تغذیه و غیره تشکیل شده‌است. این واحد به عنوان واحد صادرکننده فرمان قطع برای واحد TS، که از تجهیزات سیگنال قطع و منبع تغذیه تشکیل شده‌است، می‌باشد. واحد بریکر (B) که به عنوان بخش اجراکننده فرمان سیستم حفاظتی است، تجهیزاتی را که روی آنها خطا اتفاق افتاده از شبکه جدا می‌کند.

۳- آنالیز قابلیت اطمینان

در این مقاله از دو شاخص قابلیت دسترسی^۵ و عدم قابلیت دسترسی^۶ برای آنالیز قابلیت اطمینان استفاده شده‌است. قابلیت دسترسی برابر نسبت طول عمر مفید تجهیز که در طول این دوره دارای عملکرد صحیح می‌باشد به طول عمر تجهیز است [۱۳]. برای محاسبه این دو شاخص فرض شده‌است که هر یک از واحدهای سیستم حفاظتی دارای تابع توزیع نمایی برای تابع توزیع خرابی تجهیز هستند. با چنین فرضی این دو شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۴]:

$$U = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} (1 - e^{-\lambda t}) dt = 1 - \frac{1}{\lambda T_c} (1 - e^{-\lambda T_c}) \quad (1)$$

اگر $\lambda T_c \ll 1$ باشد رابطه (۱) با بسط تیلور به رابطه تقریبی (۲) برای محاسبه قابلیت عدم دسترسی تجهیز تبدیل می‌شود:

$$U = \frac{\lambda T_c}{2} \quad (2)$$

و شاخص قابلیت دسترسی هر تجهیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

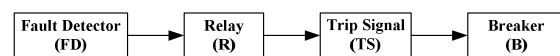
$$A = 1 - U \Rightarrow A = 1 - \frac{\lambda T_c}{2} \quad (3)$$

شبکه قدرت دیده شده‌است. در [۱۲] مدل مارکوف برای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن سیستم حفاظتی موازی گسترش یافته است.

در این مراجع آنالیز قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن احتمال خرابی برای رله پشتیبان انجام گرفته است ولی این فرض درست نمی‌باشد، چرا که عملکرد نابجا و یا عدم عملکرد رله پشتیبان در هنگام عدم عملکرد رله اصلی می‌تواند سبب خاموشی گسترده در شبکه قدرت شود و خسارات جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد. لذا با توجه با اهمیت موضوع در این مقاله ابتدا تحلیل قابلیت اطمینان برای زمان تست دوره‌ای معین با و بدون در نظر گرفتن احتمال خرابی برای رله پشتیبان انجام شده‌است و سپس تأثیر نرخ خرابی رله پشتیبان بر روی زمان تست دوره‌ای برای داشتن میزان قابلیت دسترسی حالت مرجع، مورد آنالیز قرار گرفته است. منظور از حالت مرجع، حالتی است که آنالیز قابلیت اطمینان با فرض اینکه رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان است انجام شده‌است. همان‌طور که از نتایج حاکی است زمان تست دوره‌ای و قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی وقتی که احتمال خرابی برای رله پشتیبان وجود دارد، کاهش یافته است.

۲- مدل سیستم حفاظتی

برای آنالیز قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با استفاده از روش درخت حوادث، لازم است که یک مدل مناسب برای سیستم حفاظتی در نظر گرفته شود که این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم حفاظتی

با توجه به شکل ۱ هر سیستم حفاظتی از تجهیزات مختلفی تشکیل شده‌است، که برای عملکرد درست سیستم لازم است که تمامی این تجهیزات دارای عملکرد مناسب باشند. البته قابل ذکر است که عملکرد بعضی از این تجهیزات به عملکرد تجهیز قبلی آن بستگی دارد. هر یک از بلوک‌ها از تجهیزات مختلفی تشکیل شده‌اند که برای سادگی تحلیل هر یک از بلوک‌ها با یک تجهیز و با یک تابع توزیع نمایی با پارامتر ثابت λ برای تابع توزیع خرابی تجهیز مدل شده‌اند.

⁵ -Availability

⁶ -Unavailability

۴- نتایج مطالعه

در این بررسی نرخ خرابی همه واحدهای سیستم حفاظتی به جزء رله پشتیبان برابر ۰/۰۲ و همچنین فاصله بین دو تست متوالی برای همه واحدها یکسان فرض شده است [۱۲].

۴-۱- تأثیر نرخ خرابی رله پشتیبان بر روی قابلیت اطمینان سیستم

برای بررسی تأثیر نرخ خرابی رله پشتیبان بر روی قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی، شاخص‌های قابلیت دسترسی و قابلیت عدم دسترسی را برای حالتی که رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان است با حالتی که نرخ خرابی رله پشتیبان برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۴ خرابی بر سال است، را برای فاصله زمانی‌های تست دوره‌ای یک ساله، شش ماهه و سه ماهه محاسبه شده‌اند، که نتایج در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۱: شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی بادر نظر گرفتن قابلیت اطمینان کامل برای رله پشتیبان

شاخص	فاصله بین دو تست متوالی		
	سه ماهه	شش ماهه	دوازده ماهه
A	0.9925187	0.9850749	0.9702990
U	0.0074813	0.0149251	0.0297010

جدول ۲: شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی بادر نظر گرفتن نرخ خرابی ۰/۰۲ برای رله پشتیبان

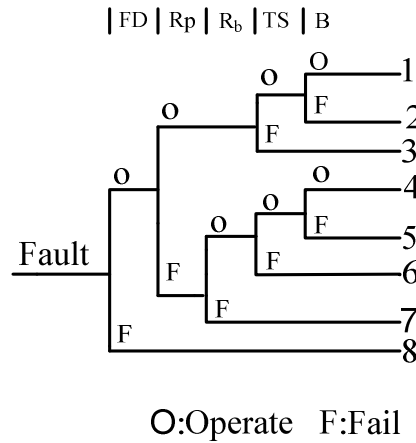
شاخص	فاصله بین دو تست متوالی		
	سه ماهه	شش ماهه	دوازده ماهه
A	0.9925125	0.9850503	0.9702020
U	0.0074875	0.0149498	0.0297980

جدول ۳: شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی بادر نظر گرفتن نرخ خرابی ۰/۰۴ برای رله پشتیبان

شاخص	فاصله بین دو تست متوالی		
	سه ماهه	شش ماهه	دوازده ماهه
A	0.9925063	0.9850256	0.9701049
U	0.0074937	0.0149744	0.0298951

که در این روابط T_c فاصله بین تست‌های متوالی است و λ نرخ خرابی تجهیز است.

درخت حوادث برای سیستم حفاظتی شامل یک واحد تشخیص دهنده خطا (FD)، رله‌های اصلی و پشتیبان (R_p و R_b)، TS مشترک برای رله‌های اصلی و پشتیبان و بریکر (B) در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: درخت حوادث سیستم حفاظتی مورد مطالعه

احتمال مسیره‌های درخت حوادث با استفاده از روابط (۴) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= A_{FD} \times A_{R_p} \times A_{TS} \times A_B \\
 P_2 &= A_{FD} \times A_{R_p} \times A_{TS} \times U_B \\
 P_3 &= A_{FD} \times A_{R_p} \times U_{TS} \\
 P_4 &= A_{FD} \times U_{R_p} \times A_{R_b} \times A_{TS} \times A_B \\
 P_5 &= A_{FD} \times U_{R_p} \times A_{R_b} \times A_{TS} \times U_B \\
 P_6 &= A_{FD} \times U_{R_p} \times A_{R_b} \times U_{TS} \\
 P_7 &= A_{FD} \times U_{R_p} \times U_{R_b} \\
 P_8 &= U_{FD}
 \end{aligned} \quad (4)$$

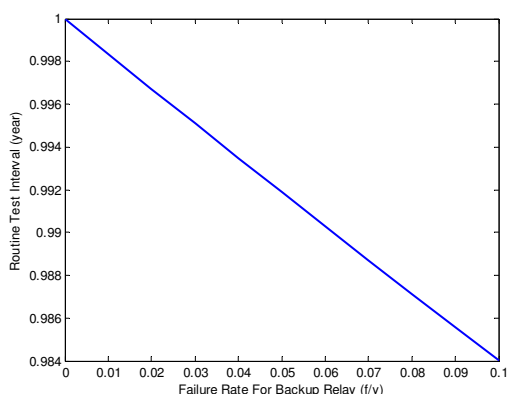
که در روابط (۴) به عنوان نمونه U_{FD} و A_{FD} به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 U_{FD} &= \frac{\lambda T_{cFD}}{2} \\
 A_{FD} &= 1 - U_{FD}
 \end{aligned} \quad (5)$$

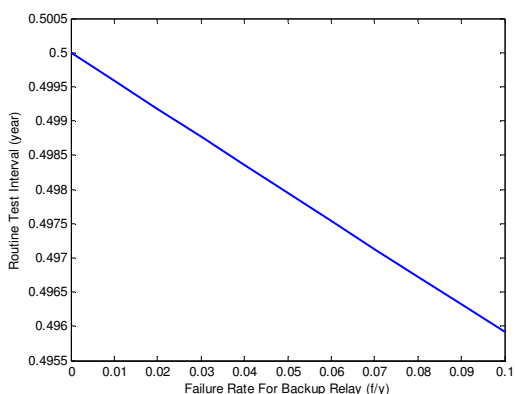
سایر پارامترها مشابه رابطه (۵) محاسبه می‌شوند. دو شاخص قابلیت دسترسی و عدم قابلیت دسترسی سیستم حفاظتی مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌گردند:

$$\begin{aligned}
 A &= P_1 + P_4 \\
 U &= P_2 + P_3 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8
 \end{aligned} \quad (6)$$

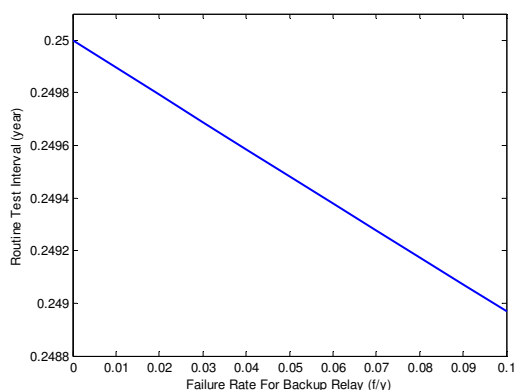
نمونه نرخ خرابی برابر 0.03 فرض شود فاصله زمانی تست دوره‌ای به 0.995 سال کاهش می‌یابد.



شکل ۳: تغییرات تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی پشتیبان برای دوره رله دوازده ماهه



شکل ۴: تغییرات تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان برای دوره شش ماهه



شکل ۵: تغییرات تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان برای دوره سه ماهه

با توجه به شکل‌های ۳، ۴ و ۵ دیده می‌شود که منحنی تغییرات تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی برای رسیدن به قابلیت دسترسی حالت مرجع، دارای شیب تغییرات متفاوتی است، که در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که، با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کامل برای رله پشتیبان، میزان قابلیت دسترسی سیستم حفاظتی 0.9702990 بوده، که با در نظر گرفتن نرخ خرابی 0.02 برای رله پشتیبان به 0.9702020 کاهش یافته است و میزان عدم قابلیت دسترسی سیستم حفاظتی از 0.0297010 به 0.0297980 افزایش می‌یابد. برای سایر فواصل زمانی تست دوره‌ای چگونگی تغییرات شاخص‌ها نیز به همین منوال است. البته با توجه به جداول ۱، ۲ و ۳ میزان افزایش عدم قابلیت دسترسی و کاهش قابلیت دسترسی با افزایش نرخ خرابی رله پشتیبان برای فواصل زمانی متفاوت تست دوره‌ای محسوس‌تر است.

۲-۴- تأثیر نرخ خرابی رله پشتیبان بر روی زمان تست دوره‌ای

برای بررسی چگونگی تغییرات زمان تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان، ابتدا یک حالت مرجع فرض شده است به طوری که در حالت مرجع رله پشتیبان صد در صد قابل اطمینان در نظر گرفته شده است. حال در صورتی که رله پشتیبان دارای قابلیت اطمینان صد در صد نیست، هدف تعیین فاصله زمانی تست دوره‌ای است به گونه‌ای که میزان قابلیت دسترسی با حالت مرجع یکسان باشد. برای این منظور سه حالت متفاوت (سه ماهه، شش ماهه و دوازده ماهه) در نظر گرفته شده است که در آن قابلیت اطمینان رله پشتیبان صد در صد فرض شده است. برای دستیابی به قابلیت دسترسی مشابه با حالتی که رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان فرض شده است، لازم است زمان تست دوره‌ای نسبت به حالت مرجع کاهش یابد. بدین منظور شبیه‌سازی‌های متعددی بر اساس یکسان فرض کردن قابلیت دسترسی با نرخ‌های خرابی متفاوت برای رله پشتیبان صورت پذیرفته است که نتایج در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. به عنوان نمونه شکل ۳ نشان دهنده میزان کاهش زمان تست دوره‌ای نسبت به حالت مرجع با فرض دوره دوازده ماهه است. مشاهده می‌گردد در صورتی که نرخ خرابی صفر (صد در صد قابلیت اطمینان) برای رله پشتیبان فرض شود زمان تست دوره‌ای همان دوازده ماه خواهد بود، اما اگر به عنوان

مطلوب حالت مرجع، با افزایش فاصله زمانی مرجع افزایش یافته است. با توجه به نتایج فوق، به نظر می‌رسد که احتمال خرابی برای رله پشتیبان، در تحلیل قابلیت اطمینان سیستم قدرت و برآورد هزینه تست دوره‌ای پست‌ها بایستی در نظر گرفته شود.

جدول ۴: شیب منحنی تغییرات فاصله زمانی تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان

شاخص	فاصله زمانی مرجع بین دو تست متوالی		
	سه ماهه	شش ماهه	دوازده ماهه
شیب تغییرات	0.01	0.04	0.115

مراجع

- [1] 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.
- [2] H. Seyedi, M. Fotuhi and M. Sanaye-Pasand, "An Extended Markov Model to Determine the Reliability of Protective System", IEEE Power India Conf., April 2006.
- [3] IEEE Working Group D5 of the Line Protection Subcommittee, Power System Relaying committee, "Proposed Statistical Performance Measures for Microprocessor-based Transmission-line Protective Relays-Part1: Explanation of the Statistic", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 134-143, Jan. 1997.
- [4] J.J. Kumm, M.S. Weber, D. Hou and E.O. Schweitzer, III, "Predicting The Optimum Routine Test Interval for Protection Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 659-665, April. 1995.
- [5] K. Kangvansaichol, P. Pittayapat, B. Eua-Arporn, "Routine Test Interval Decision for Protective Systems Based on Probabilistic Approach", IEEE International Conference On Power System Technology, Vol. 2, pp. 977-982. Dec. 2000.
- [6] M.C. Bozchalui, M. Sanaye-Pasand, M. Fotuhi-Firuzabad, "Composite System Reliability Evaluation Incorporating Protection System Failures", IEEE the 18th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE, Saskatoon; Canada, May 2005.
- [7] West System Council Final Report, August 10th 1996 event, Oct. 1996.
- [8] X. Yu and C. Singh, "Power System Analysis Considering Protection Failures", IEEE Power Engineering Society Summer

با توجه به شکل‌های ۳، ۴ و ۵ دیده می‌شود که با افزایش نرخ خرابی رله پشتیبان، فاصله زمانی بین دو تست متوالی برای داشتن قابلیت دسترسی مطلوب کاهش پیدا کرده است، که این امر به نوبه خود افزایش هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم حفاظتی را به همراه دارد. هم‌چنین با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که، شیب منحنی تغییرات تست دوره‌ای با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان از مقدار ۰/۰۱، برای داشتن قابلیت دسترسی مطلوب حالت مرجع با فاصله زمانی تست دوره‌ای سه ماهه به مقدار ۰/۱۱۵ برای داشتن قابلیت دسترسی مطلوب حالت مرجع با فاصله زمانی تست دوره‌ای دوازده ماهه افزایش یافته است. با توجه به نتایج مطالعه به نظر می‌رسد که تغییرات فاصله زمانی تست دوره‌ای و قابلیت اطمینان با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان چندان ملموس نیست. اما باید ذکر شود که این نتایج فقط برای یک سیستم حفاظتی است، لذا در شبکه قدرت که دارای چندین سیستم حفاظتی است، تغییرات فاصله زمانی تست دوره‌ای و قابلیت اطمینان با تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان می‌تواند جالب توجه باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله آنالیز قابلیت اطمینان برای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای رله پشتیبان انجام شده است و هم‌چنین چگونگی تغییرات تست دوره‌ای سیستم حفاظتی برای داشتن قابلیت اطمینان مطلوب مورد تحلیل قرار گرفته است. همان‌طور که از نتایج حاکی است، قابلیت دسترسی سیستم حفاظتی با افزایش نرخ خرابی رله پشتیبان برای فاصله زمانی معین تست دوره‌ای کاهش یافته است. هم‌چنین فاصله زمانی بین دو تست متوالی برای داشتن قابلیت دسترسی مطلوب حالت‌های مرجع، با افزایش نرخ خرابی رله پشتیبان کاهش یافته است. شیب منحنی تغییرات تست دوره‌ای نسبت به تغییر نرخ خرابی رله پشتیبان برای داشتن قابلیت دسترسی



- [12] P. M. Anderson, G.M. Chintaluri, S.M. Magbuhat and R.F. Ghajar, " An Improved Reliability Model for Redundant Protective System –Markov Models", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 573-578, May 1997.
- [۱۳] علی سعیدیان، مالک قنواتی، " تعیین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و خود بازبینی در تجهیزات حفاظتی با استفاده از یک مدل قابلیت اطمینان " اولین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، آذر ۱۳۸۵.
- [14] R. Billinton and R.N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Boston Pitnon books,1984.
- Meeting, Vol. 2, pp. 963-968, July 2002.
- [9] A.R. Alesaadi, M. R. Haghifam, M. Fotuhi Firouzabad, N. Moslemi and J. Abbasi, "An Approach for Modeling the Protection System in Transmission Network Reliability Evaluation", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific Dalian, China, 2005
- [10] M. Shahidehpor, R. Allan, R. Billinton and etc; "Effect of Protection Systems on Bulk Power Reliability Evaluation ", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 198-205, Feb. 1994.
- [11] J.J. Meeuwsen, W.L. King and W.A.G.A. Ploem, "The Influence of Protection System Failures and Protective Maintenance on Protection System in Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 125-133, Jan. 1997.