



AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO AUTOTESTE E OUTROS MÉTODOS DE MONITORAMENTO EM RELÉS DE PROTEÇÃO

**JOHN J. KUMM
EDMUND O. SCHWEITZER, III
DAQING HOU
SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC.
PULLMAN, WASHINGTON
USA**

Apresentado no

**PEA RELAY COMMITTEE SPRING MEETING
MATAMORAS, PENNSYLVANIA
MAY 25-26, 1995**

INTRODUÇÃO

Os relés de proteção microprocessados efetuam autotestes para determinar que os subsistemas do relé estejam funcionando corretamente. Um artigo mais recente destes autores mostrou que a confiança no autoteste do relé, seguramente permite sua utilização para aumentar o intervalo da tradicional rotina de manutenção para estes relés.

Este artigo mais adiante define a eficiência do autoteste em relés digitais. O método de monitoramento de relés digitais são apresentados como extensão da capacidade de autoteste. O modelo estatístico quantifica os benefícios dos autotestes em relés e ilustram a utilidade de monitoramentos adicionais. O resultado sugere um novo modelo para a rotina de manutenção e monitoramento de relés digitais.

- Contatos de alarmes monitorados por monitor digital
- Alarme de perda de sinal monitorado por monitor digital (quando possível)
- Analisar relatórios de eventos o mais cedo possível seguindo cada evento
- Uso de funções de controle de saída do relé para verificar os contatos de saída, se falhas são raras
- Comparar leituras medidas no relé com outras medidas para verificar a calibração de ambos dispositivos.

PORQUE TESTAR OS RELÉS DE PROTEÇÃO ?

O objetivo do teste em relés de proteção é para maximizar a disponibilidade da proteção e minimizar os riscos de operações erradas do relé. Pensando nisso, nós temos que definir testes adequados e monitoramentos práticos para os relés digitais de proteção.

RELÉS DIGITAIS AUTOTESTADOS

Relés digitais usam um microprocessador, uma aquisição de dados de sinais AC, componentes de memória contendo os algoritmos do relé, contatos de entrada para controle do relé e contatos de saída para controle de outros equipamentos. O algoritmo e ajustes contidos na memória do relé definem a característica da proteção.

Relés digitais usualmente incluem funções de autoteste automático. Estes autotestes verificam a correta operação de componentes críticos do relé. Se o autoteste detecta uma condição anormal, o relé pode fechar um contato de saída, enviar a mensagem, ou providenciar alguma outra indicação de falha. O relé desabilita as funções de trip e controle com a detecção de certas falhas no autoteste.

Desde que autotestes em relés digitais são executados freqüentemente, eles detectam falhas em componente logo após eles ocorrerem. No mínimo, esses autotestes incluem

testes nos chips de memória, conversor análogo/digital, fonte de alimentação e microprocessador.

É conveniente considerar os relés digitais em três seções :

1. Seção de entradas analógicas
2. Circuitos dos contatos de entrada/saída
3. Seção de processamento

A seção de entradas analógicas, consiste na conexão dos sinais, transformadores isoladores, filtros passa-baixo um ou mais multiplexadores e o conversor analogo-digital. O autoteste automático monitora parcialmente a seção de entradas analógicas. Desde que a parcela de entradas analógicas não seja totalmente testada, as praticas de manutenções deveriam verificar os componentes de entrada analógica.

Os circuitos dos contatos de entrada/saída são outra parte do relé digital que permitem somente um autoteste automático parcial. É possível projetar este hardware para uma redundância completa e verificável através do autoteste. Entretanto, o hardware existente é confiável, e o custo adicional par um hardware mais complexo não é justificável. A verificação de rotina nos contatos de saída e entradas ópticoisoladas é apropriada quando os equipamentos não operam regularmente em resposta à falhas.

A seção de processamento digital, tipicamente um microprocessador, é a interface entre a seção de entrada analógica e a seção dos contatos de entrada/saída. Autotestes monitoram o processador e componentes de memória associadas. Desde que as seções de contatos de entrada e saída e analógica não podem funcionar sem a seção de processamento, o uso normal também verifica a seção de processamento do relé.

A eficiência do autoteste define a parte de todas as falhas do relé que podem ser detectadas pelas funções de autoteste do relé. Dados de campo mostram que um valor pratico de eficiência do autoteste é de 80%. Seria possível projetar o hardware e o software do relé para descobrir quase todos os defeitos, mas isto tornaria o relé muito caro. Entretanto, é importante para fabricantes de relés projetar um hardware confiável, e incorporar testes simples para detectar as muitas possibilidade de falhas. Para beneficiar a operação de autoteste do relé, deveriam ser monitoradas as saídas de contatos de alarme de todos relés digitais.

MONITORAMENTO DAS CARACTERISTICAS ADICIONAIS DO RELÉ

Deveriam ser utilizadas as funções de monitoramento adicionais para detectar falhas em seção de entradas analógicas e seção de contatos de saída, aumentando a capacidade do autoteste do relé.

Muitas características da manutenção do relé são executadas por comandos remotos e muitas vezes podem substituir totalmente as rotinas de manutenção.

Perda de Tensão ou Corrente no relé – Ação característica do Autoteste

Muitos relés de distância incluem características de detecção de perda de corrente ou tensão AC. O elemento de perda de tensão (LOV) e o elemento de perda de corrente (LOI) são duas dessas características. A maioria dos relés usam a presença de certas correntes e tensões de fase ou de seqüência para diferenciar condições de falha de condições de queima de fusível ou abertura de secundário de transformadores de corrente. Além de verificar a segurança do sinal, esse monitoramento também detecta certos tipos de falhas nas entradas analógicas que podem ocorrer dentro do relé.

Por exemplo, se um transformador de tensão no relé falha, o relé pode detectar e indicar uma condição LOV. O utilitário pode monitorar o sinal LOV, comparar com um sinal similar de um outro relé conectado à fonte do sinal, determinar o ponto de falha e reparar antes que uma operação incorreta ocorra. A característica LOV é um autoteste aplicado ao relé e a alguns equipamentos fora do relé.

Medição

As características da medição em relés digitais dão ao usuário meios convenientes de verificar a presença e precisão de entradas analógicas do relé. Quando as fontes de sinal do relé e canais de entrada operam corretamente, as quantidades medidas no relé combinam as saídas de outros medidores medindo estes sinais.

A vantagem do teste na medição é que o relé permanece em serviço sendo capaz de eliminar faltas enquanto o teste está em progresso. O teste no medidor pode ser executado em uma base quase contínua sem reduzir a disponibilidade do relé.

A prática de teste em medidores é segura se o relé digital usa o mesmo circuito de medição para o relé e o medidor. Se o relé usa circuitos separados para funções de medição, os dados de medição verificam somente os componentes comuns à ambos circuitos. Por exemplo, algumas verificações adicionais devem ser feitas para verificar os elementos de medidas do relé.

Análise de dados de eventos de Relés para a detecção de problemas

Relatórios de eventos gerados pela operação de relés digitais em resposta à falhas freqüentemente contém :

- Corrente de falta e pré-falta e medições de tensão
- Indicação de estado do contato de entrada e saída do relé durante o evento
- Informações de ajuste do relé e elementos operados

A análise do relatório de evento é uma valiosa ferramenta para a manutenção. O relatório de evento mostra concisamente que o relé está medindo sinais AC e recebendo sinais de entrada de contatos DC. Quando o relé fecha o contato de saída, isto é mostrado no relatório de eventos.

A análise dos dados de falhas de relés digitais são preferíveis que a rotina de manutenção porque uma falha atual é um teste preferível ao invés do teste simulado. As respostas do sistema de potência aos sinais de controle do relé devem ser distinguidos das informações no relatório de eventos. Uma breve revisão do relatório de eventos pode indicar falhas em conexões externas ou componentes internos da seção de entrada analógica ou na seção de contatos de entrada/saída. Muitas vezes, um aperfeiçoamento no esquema de proteção pode ser descoberto revisando o conteúdo do relatório de eventos. A capacidade do relé em guardar e emitir o relatório de eventos mais adiante verifica a seção de processamento do relé.

Exercitando os Contatos de Saída

Muitos relés digitais tem a característica de permitir ao usuário controlar os contatos de saída do relé. Esta verificação checa o contato de saída e da integridade da fiação externa. A característica do comando de trip torna possível abrir o disjuntor sem necessitar um conjunto de testes.

Se o relé rotineiramente opera corretamente para falhas, As operações dos contatos são verificações adequadas das funções de entrada/saída do relé.

PRATICAS DE MANUTENÇÃO EM RELÉS DIGITAIS

Teste rotineiros eram o método primário de detecção de falhas em relés de proteção. O único outro modo de determinar que o relé falhou era observar sua operação incorreta. Testes rotineiros foram programados baseados na experiência com os dispositivos em

questão e com a avaliação dos recursos disponíveis para executar os testes. Quando os testes tendem a serem completos, mais complexos e mais tempo consomem.

Testes rotineiros em relés digitais deveriam verificar o funcionamento do relé que não podem ser verificados completamente pelo autoteste. A figura 1 mostra como todas falhas no relé podem ser detectadas usando um regime que consiste de :

- Monitoramento de alarme de autoteste
- Monitoramento de perda de sinal (LOV, LOI)
- Inspeção nos relatórios de eventos do relé
- Verificações periódicas das entradas e saídas do relé
- Calibrações periódicas através de comparações

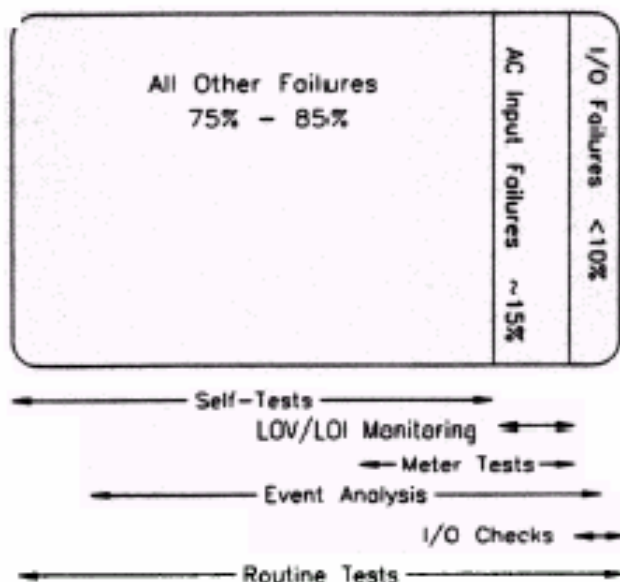


Figura 1. Autoteste e Monitoramento de Relé Digital substituem completamente as funções tradicionais.

Autoteste em relé e análise dos dados do evento detectam a maioria das falhas em relés. Monitorando as funções LOV e LOI, executando testes nos medidores e cheques de entrada/saída verificam o equilíbrio das funções do relé. Executados conjuntamente, este regime substitui a complexa rotina de testes. Estes simples testes podem ser efetuados rapidamente, minimizando a necessidade de complexos equipamentos de teste.

PROBABILIDADE DE APLICAÇÃO AO RELÉ DO MÉTODO DE TESTE

Tendo definido os testes necessários e métodos de monitoramento, é agora necessário otimizar o intervalo de teste. Vários artigos [1,3,4], descrevem métodos probabilísticos de determinar o ótimo intervalo para testes de relés de proteção. Duas medidas de probabilidade de interesse são indisponibilidade anormal e indisponibilidade da proteção.

O modelo assume que quando ocorre uma falha enquanto o relé está fora de serviço e uma grande parte do sistema de potência é isolado, que era necessário realmente remover a falha. Indisponibilidade anormal é a indisponibilidade do sistema de potência disso ocorrer como um resultado direto da operação incorreta do relé.

A indisponibilidade da proteção é a probabilidade do relé estar fora de serviço. O relé poderia estar fora de serviço devido uma falha, teste ou reparo.

A intenção da análise estatística é definir práticas que minimizam a indisponibilidade do relé e a proteção do sistema de potência.

A referencia [1] introduz um modelo definido pela condição operacional do relé e dos componentes da proteção. Os modelos consideram relés autotestados, mas não consideram outros meios de monitoramento. A figura 2 mostra um modelo que considera autoteste e modelo da rotina de verificação do relé através de outras verificações simples. Os círculos representam o modelo de estado. As setas representam o caminho da transição entre os estados.

O modelo probabilístico é dividido em quatro quadrantes representando a condição do relé (Proteção) e a linha (componente). O estado 1 representa uma condição de operação normal onde a linha é energizada (componente UP) e o relé é operado corretamente (protection UP). Quando ocorre uma falha na linha, o componente faz a transição para o estado abaixo, representado pelo estado 2. No estado 2, ocorre uma falha na linha e o sinal envia um sinal para abrir o disjuntor. A operação do disjuntor leva o modelo do sistema para o estado 6, onde a linha é isolada. A linha é reparada e re-energizada, levando o modelo de volta ao estado 1.

O modelo entra no estado 3 do estado 1 quando uma falha no relé ocorre e não é detectada pela função de autoteste do relé e poderia não ser detectada por check no medidor.

Representando o relé com graus variados de autotestes eficientes pelo ajuste de ST (veja a definição que segue). A taxa de falha global do relé (F_p) é multiplicada por ST, para indicar a porção de falhas detectadas pelos autotestes ou pelas funções de perda de sinal (LOV/LOI).

A probabilidade do modelo residir em um determinado estado depende do caminho da transição e da taxa entre os estados. As taxas de transição do modelo são definidas abaixo :

Taxas de Falha :

- Fp Falhas do relé por ano (MTBF)
- ST Índice de eficiência do autoteste (por unidade)
- ME índice de medida da eficiência do autoteste (por unidade)
- Fat Falhas encontradas pelo autoteste (Fp.ST) por ano
- Fme Falhas encontradas pelo teste de medição (Fp.ME), falhas por ano
- Fpp Falhas não encontradas no relé por outros meios (Fp.[1-ST-ME]) falhas por ano
- Fc Falhas em componentes, faltas por ano
- Fcc Falhas por causas comuns entres o relé e os componentes, , falhas por ano

Taxas de Reparo

- Rc Reparo em componentes da proteção por hora
- Rt Rotina de inspeção por hora
- Rr Reparo em relés por hora

Taxa de Permuta

- Sn Operação normal de abertura por hora
- Sb Operação backup de abertura por hora
- Sm Operação de isolamento manual por hora

Taxa de inspeção

- lpm Intervalo de inspeção na rotina da proteção , horas
- θ pm Taxa de inspeção na rotina da proteção (l/lpm)
- lme Intervalo de inspeção no medidor da proteção, horas
- θ me Taxa de inspeção no medidor da proteção (i/lme)

A menos que registrado de outra formas, os modelos usam as taxas de transição que se seguem:

- Fp = 0,01 falhas de relé por ano (MTBF = 100 anos)
- Rr = 0,5 reparos em relés por ano
- Rt = 2.0 testes de rotina em relés por hora
- Rc = 0.5 reparos em componentes por hora
- Fcc = 1.0 falhas por causas comuns por milhões de horas

S_n = 43200 operações por hora (recíproco do tempo de eliminação da falha de 5 ciclos)

S_b = 10800 operações por hora (recíproco do tempo de backup de eliminação da falha de 20 ciclos)

S_m = 0.5 operações por hora (2 horas para isolar o componente após a operação do backup)

CALCULO DOS RESULTADOS USANDO O NOVO MODELO ESTATISTICO

Do modelo, nos podemos calcular a indisponibilidade anormal e indisponibilidade da proteção de relés com ou sem autoteste e com ou sem teste de medidores, simplesmente pelo ajuste da taxa de transição que define o modelo.

À figura 3 mostra a indisponibilidade anormal versus o intervalo de teste de rotina para um sistema utilizando um relé que não tem autoteste, monitoramento de sinal ou dispositivos de medições. O gráfico é para um relé de proteção. O intervalo de rotina de teste ótimo é o ponto onde a indisponibilidade anormal é baixa : aproximadamente 700 hora ou 1 mês. Quando o intervalo de teste é pequeno, o relé esta freqüentemente fora de serviço devido à testes. Nesta área, o relé está sendo muito testado e provavelmente perca alguma falta que ocorra. Quando o intervalo de teste é longo, torna-se mais provável de o relé ficar fora de serviço devido a problemas não existentes : o relé esta sendo muito testado.

Os resultados indicam, para se alcançar uma maior segurança, o intervalo de teste em relés devem ser menores que o intervalo entre faltas. Isso também sugere que, se possível, o relé deva permanecer em serviço enquanto se executa o teste. Isto é precisamente o que fazem o autoteste e verificadores de medidas para relés digitais.

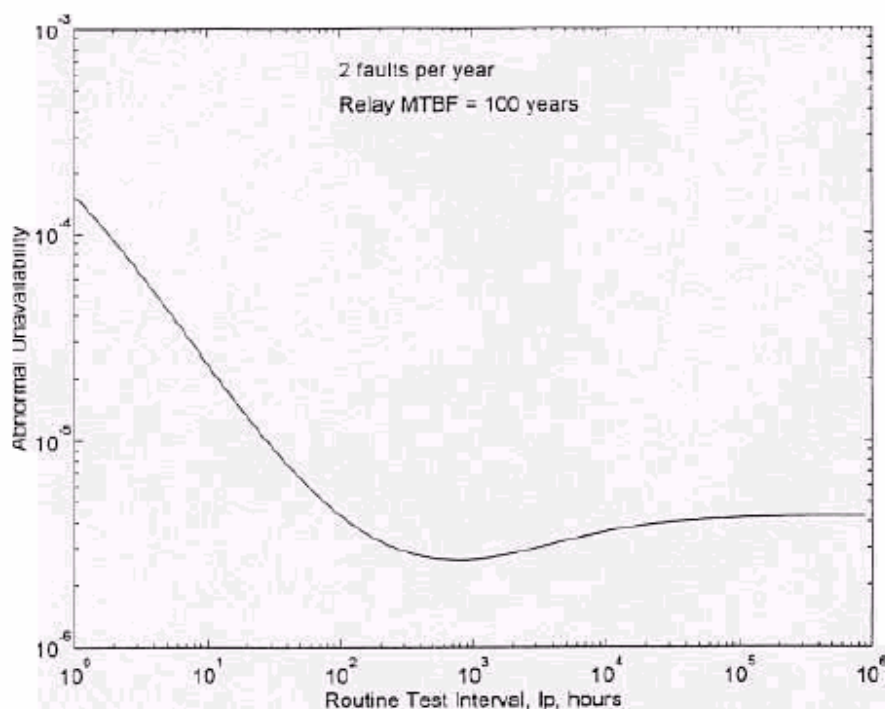


Figura 3 : Intervalo de teste ótimo para relés sem autoteste

A figura 4 compara relés com e sem autoteste com base na indisponibilidade da proteção. A figura 4 mostra o sinal representado por quatro tipos de relés autotestados. Quando $ST = 0\%$ o relé não é equipado com autoteste. Quando $ST = 50\%$, o autoteste do relé detecta metade de todas as falhas do relé imediatamente. Quando $ST = 90\%$ e 99% , o autoteste do relé detecta 90% e 99% de falhas de relés respectivamente. Neste exemplo, testes de medições não são usados, então falhas não detectadas pelo autoteste são somente detectadas quando o relé é testado ou quando uma operação incorreta do relé ocorrer.

A figura 4 mostra que o relé sem autoteste ($ST = 0\%$) tem 10 vezes mais probabilidade que os relés com 90% de autotestes de serem colocados fora de serviço devido a falhas no relé quando a rotina de teste tem um intervalo de 10^5 horas (aproximadamente 11 anos). O relé sem autoteste tem 100 vezes mais probabilidade que um relé com 99% de autoteste para ficar fora de serviço. Somado a isso, o relé com 99% de autoteste mostra uma indisponibilidade da proteção decrescente quanto aumentamos o intervalo de teste. Este relé tem menos probabilidade de perder uma falta se o intervalo de teste é longo. Isso nos dá um resultado surpreendente: para melhorar a disponibilidade, teste este relé menos frequentemente. A figura 5 mostra uma indisponibilidade anormal para quatro sistemas semelhantes.

As figuras 4 e 5 ilustram um ponto importante : como a eficiência do relé autotestado aumenta, a confiança em outros tipos de testes podem ser seguramente reduzida.

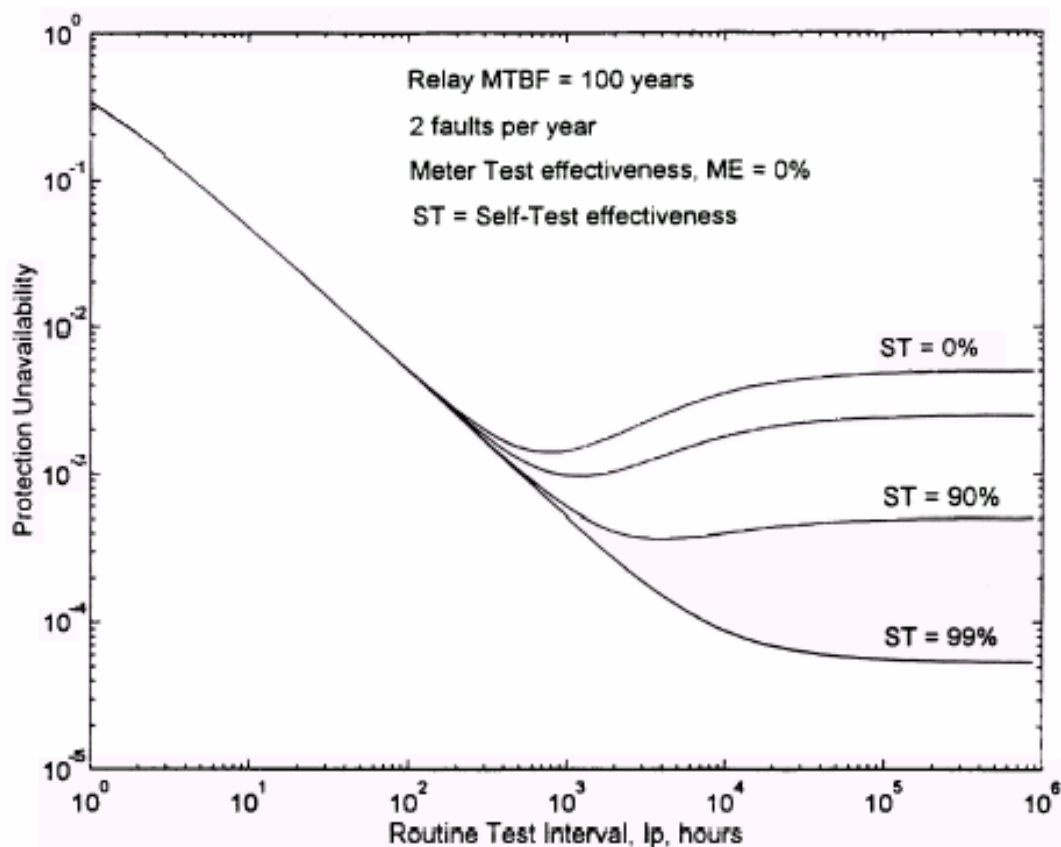


Figura 4: Valores de relés com autoteste

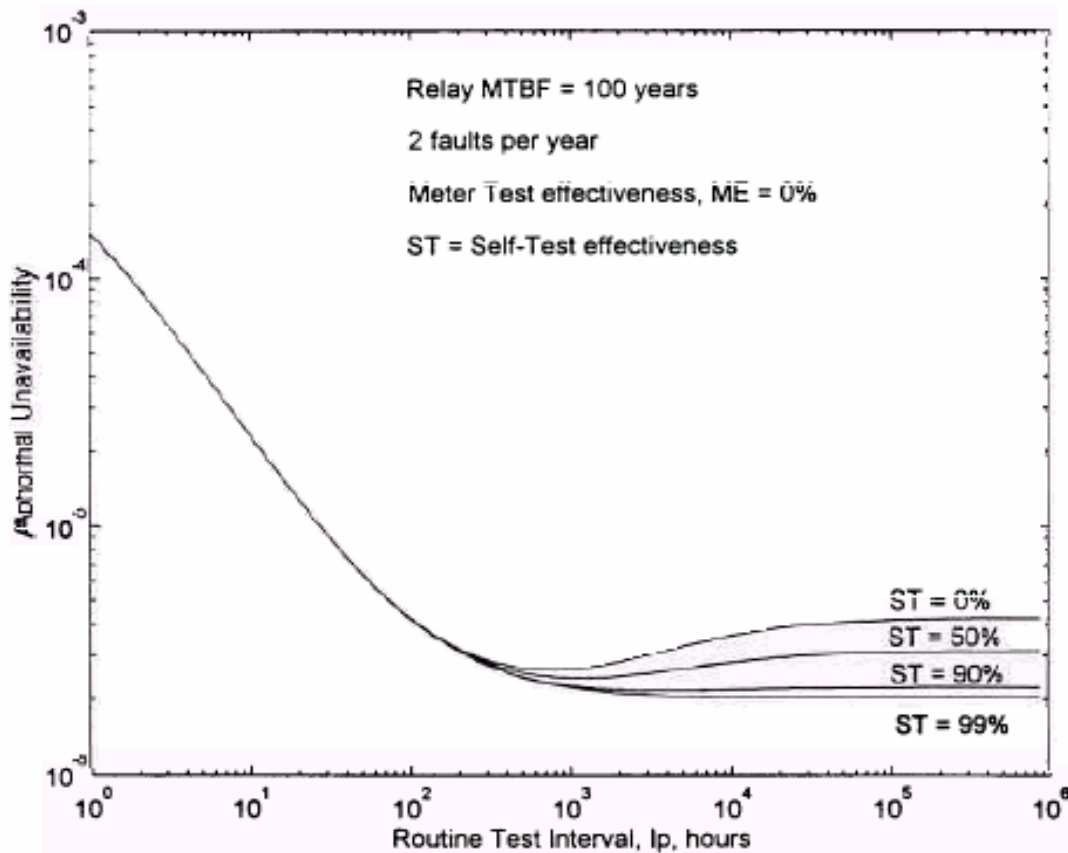


Figura 5: Valores de relés com autoteste

Quando examinamos a eficiência do autoteste para um modelo particular ou marca de relé, é necessário considerar os métodos de monitoramento adicionais descritos anteriormente. O primeiro método ilustrado é o teste de medição periódica.

A figura 6 mostra o efeito de revisar a função de medição de saída do relé periodicamente para determinar que a seção de entrada analógica do relé esteja operando corretamente. Para simplificar a ilustração, o intervalo da rotina de manutenção é fixada em cinco anos. Seriam verificados os contatos I/O dentro deste intervalo. A eficiência do autoteste de 80% é selecionada, baseada na performance de um tipo de relé de proteção digital.

Quando $ME = 0\%$, a função de medição não detecta falhas no relé, assim o intervalo do teste de medição não tem nenhum impacto na indisponibilidade anormal do sistema. Quando $ME = 20\%$ o teste de medição detecta 20% das falhas em relés.

Quando a eficiência do teste de medição é 20%, o intervalo de teste ótimo é de 500 horas, ou três semanas. Isto é aproximadamente 8 vezes tão freqüente quanto a ocorrência de faltas. Enquanto testes de medição são adicionados para proporcionar alguns benefícios para a disponibilidade do sistema, nos vemos da figura 6 que o benefício adicional pela adição do teste de medição não é tão grande quanto o benefício do monitoramento dos alarmes do relé autotestado.

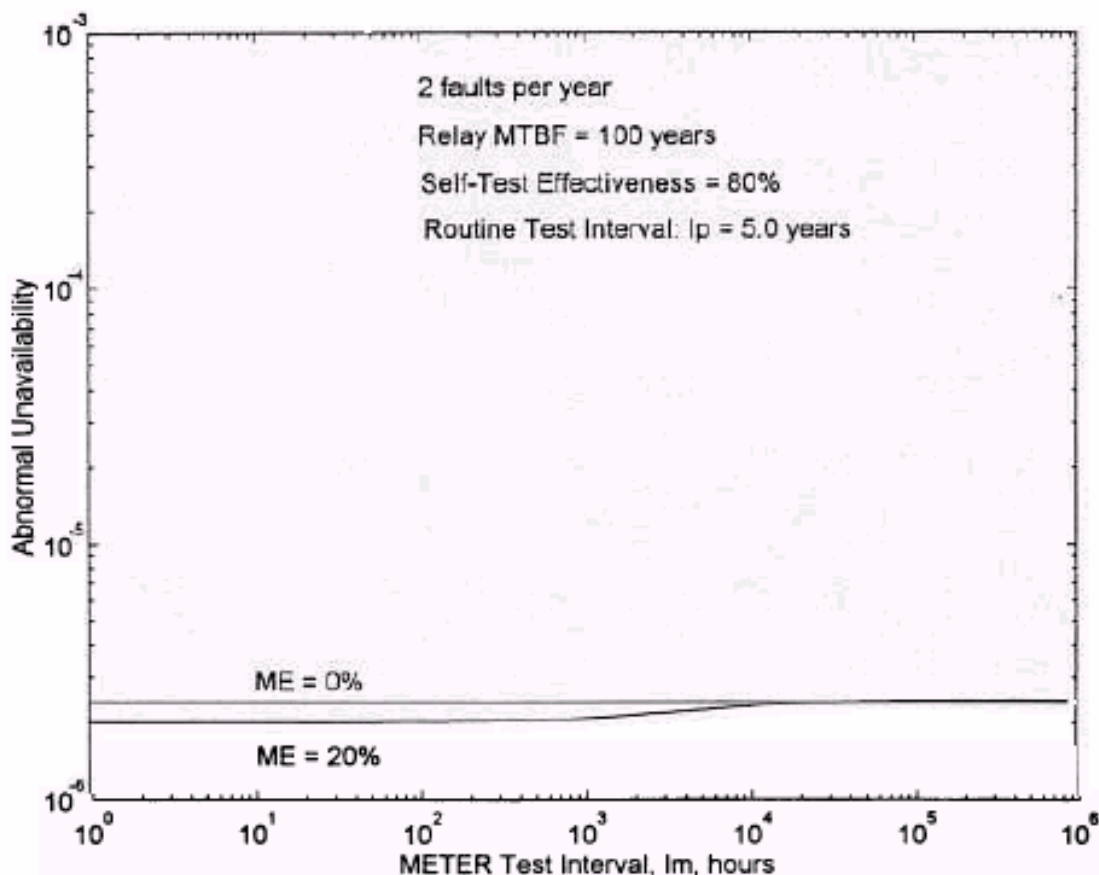


Figura 6 : Benefícios da execução dos testes de medição

A figura 7 mostra o valor do uso de funções de monitoramento de sinais AC, como LOV e LOI, para aumentar o autoteste do relé. Se nos assumirmos que as funções LOV e LOI detectam 10% de falhas imediatamente, nós podemos adicionar 10% à eficiência quando o monitoramento de LOV e LOI é adicionado.

Isto é legítimo porque as funções de monitoramento de sinais AC detectam certos tipos de falhas mais rapidamente que o autoteste dos relés.

Na figura 7, a curva identificada como “No Monitoring” (não monitorado) assume a utilidade de monitorar o contato de alarme do relé, mas não monitorar a condição dos

sinais AC usando as funções LOV e LOI. A eficiência do autoteste é de 80% e 18% das falhas são detectadas por periódicas execuções das funções de medições. A curva identificada como “Monitoring” (monitorado) assume a utilidade de monitorar o alarme do autoteste e usa as funções de monitoramento do sinal AC disponível para detectar um total de 90% de falhas do relé imediatamente. Testes de medição detectam 8% de falhas. Em ambos casos, o residual de 2% de falhas são detectados por testes de performance nos contatos de entrada/saída no intervalo de 5 anos.

A figura 7 mostra que o teste de medição diminui a indisponibilidade anormal quando executada freqüentemente. Entretanto, o valor da adição do teste de medição é pequeno.

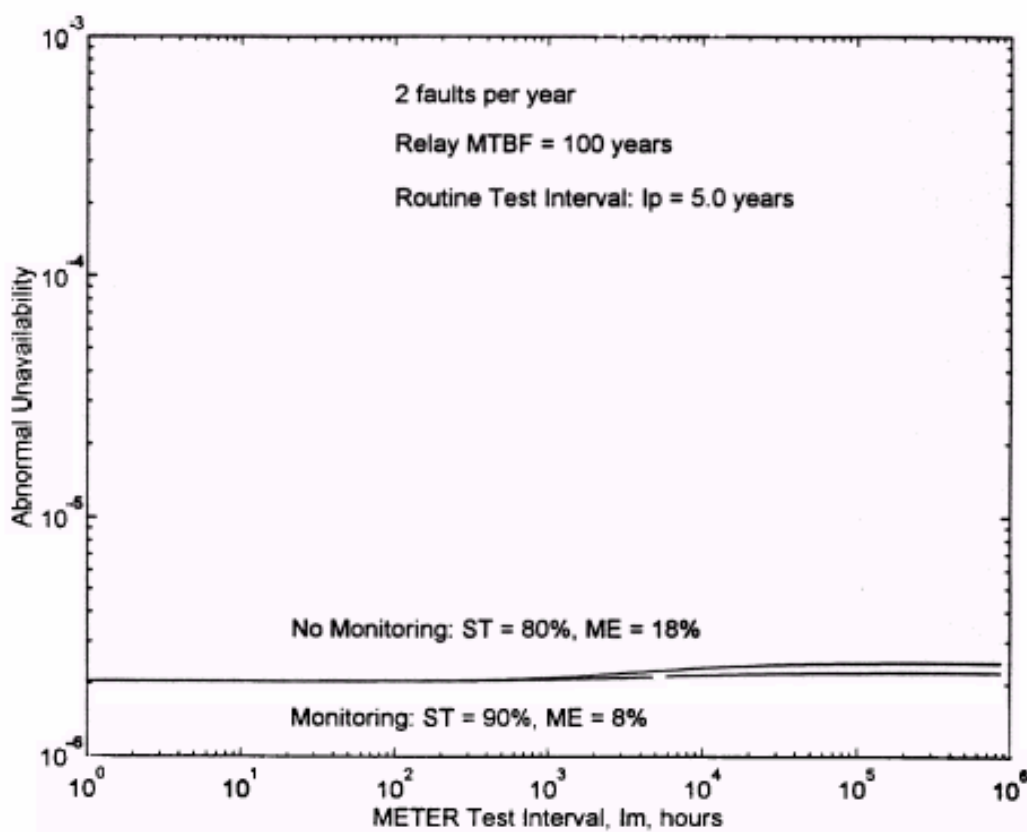


Figura 7 : Uso do monitoramento do sinal AC como um autoteste

A figura 8 mostra a indisponibilidade da proteção versus o intervalo da rotina de teste para três relés. O relé 1 não tem autoteste. O relé 2 tem autoteste com 80% de eficiência. O relé 3 tem autoteste com 80% de eficiência, aumentado pelo monitoramento das funções LOV/LOI para detectar as outras 18% de falhas no relé.

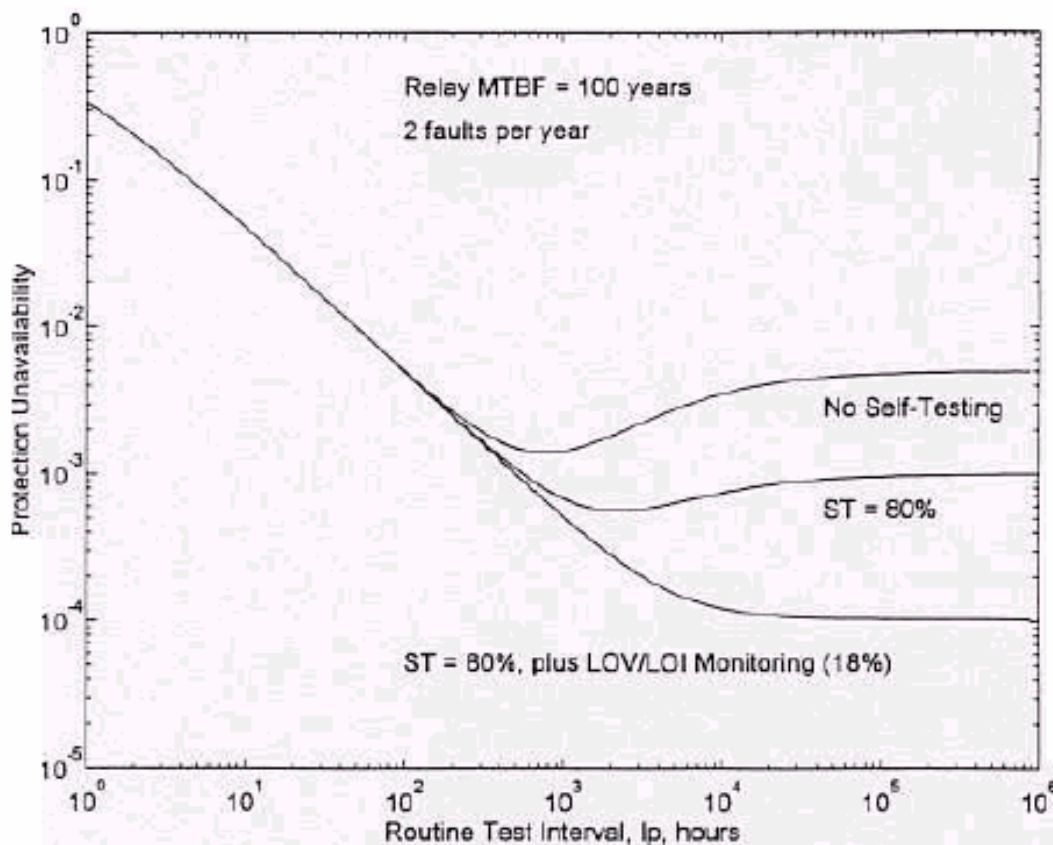


Figura 8: Comparação dos benefícios da adição de autotestes e perda do sinal de monitoramento.

CONCLUSÕES :

A característica dos relés digitais reduzem a rotina de testes para uma lista muito pequena : Verificação de medidas e testes de entrada/saída. Característica do relé e verificação de temporizações não são partes necessárias da rotina dos testes de manutenção para relés digitais.

Monitorar o contato de alarme no autoteste do relé. Mesmo que a eficiência do autoteste seja baixa, há melhoria significativa no relé e disponibilidade do sistema de potência quando as falhas no relé são detectadas e reparadas rapidamente, como mostrado na figura 8.

Monitorar funções de sinal AC para detectar a perda de tensão e corrente do relé, se disponível. Quando usada, essas funções aumentam a capacidade do autoteste do relé.

Executar verificações nas medições em bases não freqüentes. O valor da verificação da medição é para verificar a calibração do relé.

Verificar a operação dos contatos de entrada/saída pelo exame no relatório de eventos do relé, ou através de testes executados quando a linha estiver fora de serviço por outras razões. Isto minimiza o impacto do teste na disponibilidade do relé.

Use as funções de relatório do relé digital como ferramenta de manutenção. A análise do relatório de eventos irá complementar ou substituir a rotina de manutenção de relés com autoteste. A análise do relatório de eventos aumenta o entendimento do testador de relés digitais e do sistema de potência.

REFERÊNCIAS

- 1 "Philosophies for testing protective Relays, "by E.O. Schweitzer, III, J. J. Kumm, M. S. Weber, and D. Hou, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 20th Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October, 1993.
- 2 "Analysis of Event Reports, "by J. B. Roberts and E. O. Schweitzer, III, Schweitzer Engineering Laboratories, In.,, 16th Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October, 1989.
- 3 "An Improved Model for Protective-System Reliability, "by P.M. Anderson and S.K. Agarwal, Power Math Associates, Inc., IEEE Transactions on Reliability Volume 41, No.3, 1992 September.
- 4 "Graph Theory Concepts in Frequency and Availability Analysis,"by Sudhir Kumar and Roy Billinton, University of Saskatchewan, IEEE Transactions on Reliability Volume R-34, No. 4, 1985 October.

BIOGRAFIAS

Edmund O. Schweitzer, III is Presidente da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington, U.S.A., A companhia que projeta e fabrica relés de proteção baseado em microprocessadores para sistemas elétricos de potência. Ele também é professor adjunto da Universidade do estado de Washington. Ele recebeu seu BSEE na universidade de Purdue em 1968 e MSEE na Universidade de Purdue em 1971. Ele ganhou seu PhD na universidade do estado de Washington em 1977. Ele tem a autoria e

co-autoria em mais de 30 artigos técnicos. Ele é membro da Eta Kappa Nu e Tau Beta Pi.

Daqing Hou recebeu o grau BS e MS em engenharia elétrica na Universidade do Nordeste da China, 1981 e 1984 respectivamente. Ele recebeu seu Phd em engenharia elétrica e da computação na Universidade do Estado de Washington em 1991. Desde 1990, ele está na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington, U.S.A., onde é atualmente um engenheiro de pesquisa. Seu trabalho inclui simulação, modelagem de sistemas e processamento de sinais para relés de proteções digitais de sistemas de potência. Seus interesses de pesquisas incluem sistemas lineares multivariáveis, identificação de sistemas e processamento de sinais. Hou é membro do IEEE e tem autoria e co-autoria em diversos artigos técnicos.

John J. Kumm recebeu seu grau BSEE na Universidade de Idaho em 1989. Desde 1989, ele está na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington, U.S.A., onde atualmente é engenheiro de aplicações. Seu trabalho inclui suporte de produtos e especificações. Ele é membro do IEEE sociedade de engenharia de potência.

APÊNDICE A

Calcule a probabilidade que o modelo permanece em um determinado estado usando a Matriz de Transição de Markov ou usando o método “flow graph” [4]. Nos usamos o software MatLab, para executar os cálculos matriciais. Todas as taxas de transição primeiro são convertidas para operarem por hora. A matriz de transição de Markov é montada de taxas de transição e manipulada com mostrado nas equações abaixo. O vetor resultante, P , inclui a probabilidade do sistema residir em qualquer dos dez estados.

A matriz de transição de Markov para o sistema de dez estados mostrada na figura 2 é :

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & F_c & F_{pp} & F_{cc} & \Theta_{pn} & 0 & 0 & 0 & F_{st} & F_{me} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & S_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & F_c & 0 & 0 & 0 & 0 & \Theta_{pn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 & S_b & 0 & 0 \\ R_t & 0 & 0 & F_c & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & F_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & a_{77} & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_m & a_{88} & 0 & 0 \\ R_r & 0 & 0 & F_c & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{99} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_c & 0 & 0 & 0 & 0 & \Theta_{me} & a_{00} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = 1 - (F_c + F_{cc} + F_{st} + F_{pp} + \Theta_{pn} + F_{me})$$

$$a_{22} = 1 - S_n$$

$$a_{33} = 1 - (\Theta_{pn} + F_c)$$

$$a_{44} = 1 - S_b$$

$$a_{55} = 1 - (R_t + F_c)$$

$$a_{66} = 1 - (R_c + F_p)$$

$$a_{77} = 1 - (R_r + R_c)$$

$$a_{88} = 1 - S_m$$

$$a_{99} = 1 - (R_r + F_c)$$

$$a_{00} = 1 - (\Theta_{me} + F_c)$$

$$P^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10}]$$

$$P^T \cdot T = P^T \quad \text{or} \quad P^T \cdot [T - I] = 0$$

onde I = Matriz identidade

$$e \sum_i P_i = 1$$

Indisponibilidade anormal, AbUn = P4 + P8

Indisponibilidade da Proteção, ProtUn = P3 + P5 + P9 + P10