



GRUPO V

SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE FALTAS UTILIZANDO ATP, SIMULADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA E GPS

Mauro Fissassi Ushikubo*

José N. R. Romeiro Filho

COPEL

RESUMO

O trabalho mostra três etapas de ensaio da proteção das linhas S.Caxias-S.Santiago e S.Caxias-Cascavel 525 kV. Primeira etapa: Modelagem e simulação pelo ATP do todo o sistema enfatizando a modelagem do TPC e da resistência de arco de potência. Segunda etapa: Teste de modelo das proteções realizado com o RTDS de Furnas. Terceira etapa: Teste end-to-end para o comissionamento das proteções em campo utilizando arquivos do ATP e simuladores de sistema de potência sincronizados por GPS.

PALAVRAS-CHAVE

ATP, Simulador de Sistema de Potência, Teste end-to-end, Arco de Potência.

1.0 INTRODUÇÃO

Pelo fato da usina S. Caxias ter sido inserida eletricamente numa cascata de grandes usinas e também pelo fato da sua construção ter coincido com a transição de tecnologia de proteção estática para digital, a preocupação da Copel com relação ao desempenho dos novos relés digitais, operando num sistema que pode apresentar situações anormais de operação mais graves, fez com que os relés de proteção para as linhas S.Caxias-S.Santiago e S.Caxias-Cascavel 525 kV fossem testados em modelos reduzidos ou em simuladores de sistema de potência que reproduzissem com a maior fidelidade possível os fenômenos decorrentes de faltas no sistema. Seguindo esta premissa, optou-se pela simulação do sistema pelo ATP por ser possível modelar todos os componentes com os níveis de detalhes necessários para este tipo de estudo. A partir dos resultados do ATP, foram gerados

arquivos no formato Comtrade para utilização nos simuladores de sistema de potência, inicialmente em laboratório e posteriormente no campo com apoio de GPS.

2.0 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA PELO ATP⁽¹⁾.

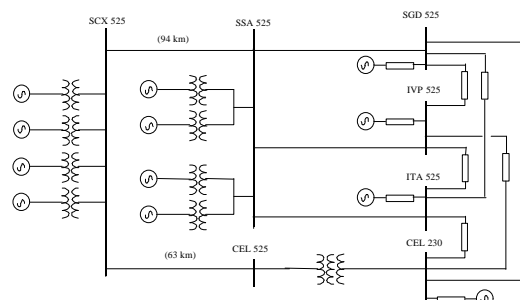


Figura 1 - Configuração do Sistema – Ano 2000

Todos os componentes do sistema elétrico mostrados na Figura 1 foram modelados, incluindo os TCs e TPCs não mostrados. O circuito do TPC, levantado no laboratório do fabricante conforme referência (2), foi modelado em detalhes no ATP, como mostra a Figura 2, pelo fato de introduzir durante faltas próximas e em linhas curtas, um subbalcance para as proteções de distância⁽³⁾.

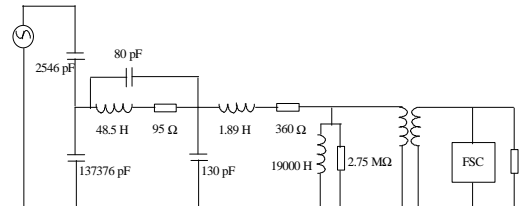


Figura 2 - Modelo do TPC

O circuito de supressão de ferroressonância (FSC) é mostrado na Figura 3.

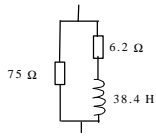


Figura 3 – Circuito de supressão de ferroressonância

Uma outra modelagem, também importante para a verificação do desempenho da proteção, é a da resistência de arco primário. Foi baseada nas referências (4), (5) e (6) e programada na rotina Models com equivalente de Thevenin. O arco primário é caracterizado pela alta corrente de curto-circuito passante em uma seção transversal ampla do arco durante sua trajetória. A condutância dinâmica do arco é obtida da solução da equação (1) apresentada por Kizilcay⁽⁶⁾.

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{T_p} (G_p - g_p) \dots\dots\dots (1)$$

Onde g_p é a condutância do arco primário e G_p é a condutância estacionária do arco primário cujo valor é determinado por:

$$G_p = \frac{|i|}{V_p L_p}$$

Onde $|i|$ é o módulo da corrente de curto-circuito instantâneo que circula pelo arco, V_p é o gradiente da tensão no arco e L_p é o comprimento do arco, considerado constante. Na faixa de 1,4 kA a 24 kA o gradiente médio da tensão é de 15 V/cm. A constante de tempo T_p é inversamente proporcional a taxa de crescimento da tensão e foi obtida empiricamente em laboratório através de ajuste experimental da curva volt-ampere do arco⁽⁵⁾. Obteve-se dessa forma a seguinte expressão para a constante de tempo:

$$T_p = \frac{\alpha \cdot I_p}{L_p}$$

Onde $\alpha = 2,85 \times 10^{-5}$ e I_p é a corrente de pico sob condições de falta franca.

Resolvendo a equação (1) pelo método da integração trapezoidal tem-se:

$$g_p(t) = \left(\frac{\Delta t}{2T_p + \Delta t} \right) \left[\frac{i(t)}{V_p L_p} \right] + \left(\frac{2T_p - \Delta t}{2T_p + \Delta t} \right) g_p(t - \Delta t) + \dots + \left(\frac{\Delta t}{2T_p + \Delta t} \right) \left[\frac{i(t - \Delta t)}{V_p L_p} \right] \quad (2)$$

Incorporando esta equação ao equivalente de Thevenin do sistema obtém-se a solução para a resistência de arco e por sobreposição tem-se a solução de todo o sistema a cada intervalo de integração.

O primeiro exemplo mostra o efeito do TPC na tensão secundária durante uma falta. Este efeito transitório do TPC afeta a medição da unidade de subbalcance do relé de distância de acordo com a relação Z_s/Z_l , ou seja, em configurações fracas (Z_s grande), em linha curtas (Z_l pequena) ou ambas. No caso de S. Caxias temos uma linha relativamente curta em se tratando de 525 kV que é o trecho S. Caxias-Cascavel. Uma condição que imporia uma fonte fraca seria a perda da linha S. Caxias-S.Santiago 525 kV e a usina S. Caxias operando com um grupo como síncrono totalmente subexcitado. Nestas condições teremos a configuração denominada de leve. Sobre esta configuração foi simulada uma falta fase-terra com ângulo de incidência de zero graus da tensão, na saída da linha S. Caxias-Cascavel em S. Caxias. As Figuras 4 e 5 mostram as tensões primária e secundária dos TPCs, desta falta, no terminal de S. Caxias.

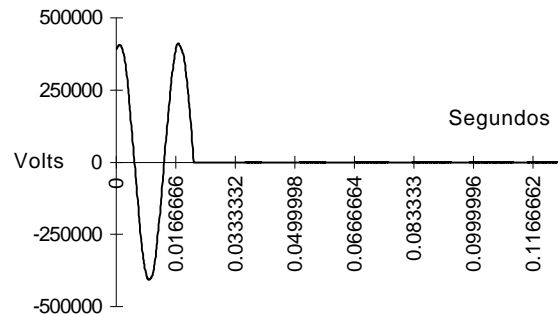


Figura 4 - Tensão primária na SE S. Caxias

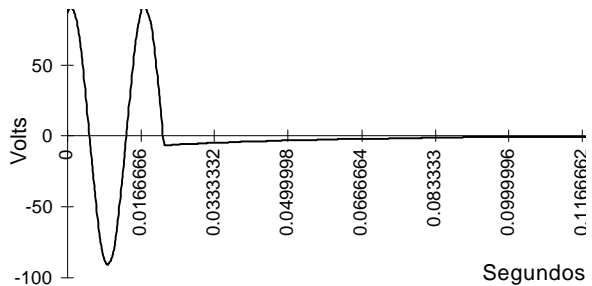


Figura 5 - Tensão secundária na SE S. Caxias

Pode-se ver pela Figura 4 que, quando a falta é aplicada, a tensão no primário do TPC cai a zero instantaneamente e pela Figura 5, pode-se ver que a tensão no secundário do TPC continua com um valor residual por uns 4 ciclos até zerar.

O segundo exemplo mostra o comportamento do arco de potência nas correntes e tensões para as configurações pesada com todos os equipamentos em operação e na configuração leve sem a linha S.Caxias-S.Santiago 525 kV e com apenas um grupo em S.Caxias operando como síncrono totalmente subexcitado e um grupo em S.Santiago. Na

configuração pesada, foi aplicada uma falta fase-terra com ângulo de incidência de zero graus da tensão, na saída da linha S. Caixas-S. Santiago 525 kV em S. Caixas. As Figuras 6 e 7 mostram as tensões secundárias na fase “A” dos TPCs nos terminais de S. Caixas e S. Santiago respectivamente.

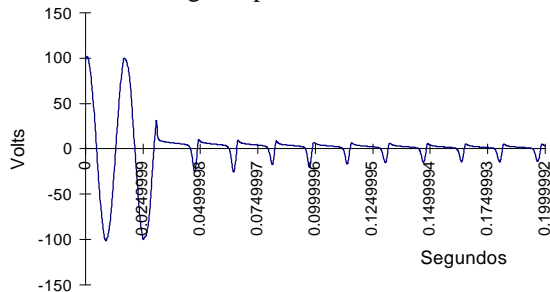


Figura 6 - Tensão secundária em S. Caixas Fase A

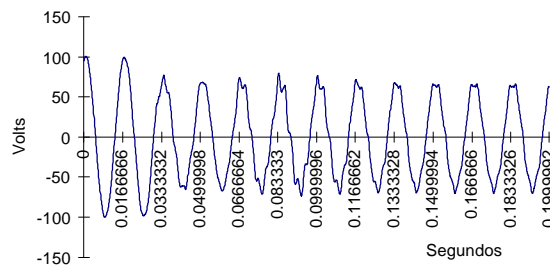


Figura 7 - Tensão secundária em S. Santiago Fase A

Como a falta é na frente do TPC de S. Caixas, o efeito maior da resistência de arco é sentido neste lado e no terminal de S. Santiago o seu efeito é muito reduzido, pelo fato da falta estar distante e a fonte ser muito forte.

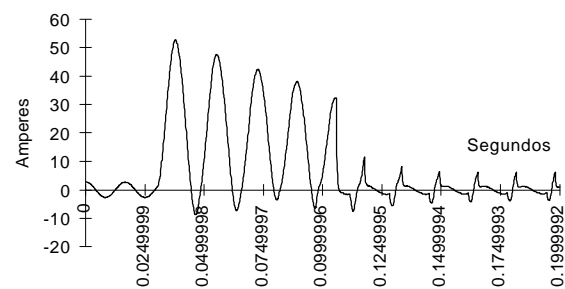


Figura 8 - Corrente de falta por S. Caixas circuito S. Santiago

As Figuras 8 e 9 mostram as contribuições de corrente para a falta no secundário do TC, dos terminais de S. Caixas e S. Santiago respectivamente. A contribuição de corrente por S. Caixas mostra um efeito de saturação de TCs na fase faltosa, conforme pode ser visto na Figura 8.

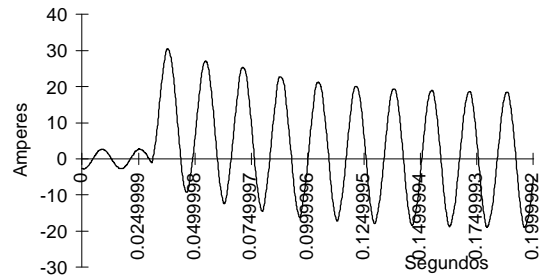


Figura 9 - Corrente de falta por S. Santiago circuito S. Caixas

Esta saturação, embora deva ser analisada com mais profundidade, se deve a uma corrente primária totalmente deslocada do eixo “x” e de elevado valor, conforme pode ser visto na Figura 10.

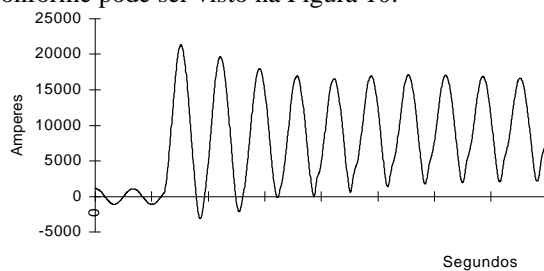


Figura 10 - Corrente de falta primária por S. Caixas - circuito S. Santiago

Na configuração leve, foi aplicada uma falta fase-terra com ângulo de incidência de zero graus da tensão na saída da linha S. Caixas-Cascavel em S. Caixas. As Figuras 11 e 12 mostram as tensões secundárias na fase “A” dos TPCs nos terminais de S. Caixas e Cascavel respectivamente.

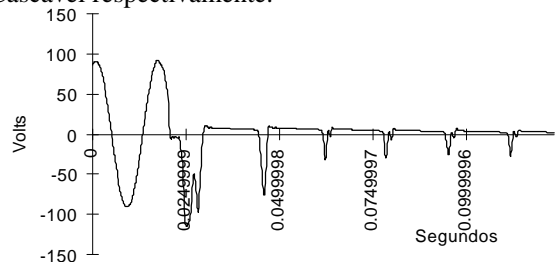


Figura 11 - Tensão secundária em S. Caixas - fase A

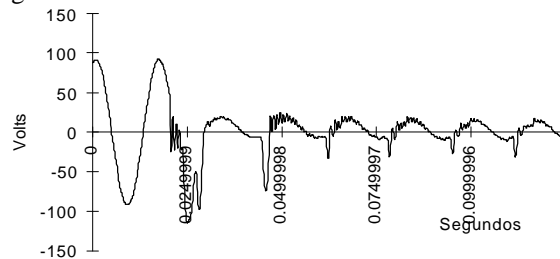


Figura 12 - Tensão secundária em S. Santiago Fase A

Nesta configuração o efeito da resistência de arco é sentido tanto em S. Caxias, próximo da falta, quanto em Cascavel, longe da falta porém fonte fraca. As Figuras 13 e 14 mostram as contribuições de corrente de falta, no secundário do TC, nos terminais de S. Caxias e S. Santiago respectivamente.

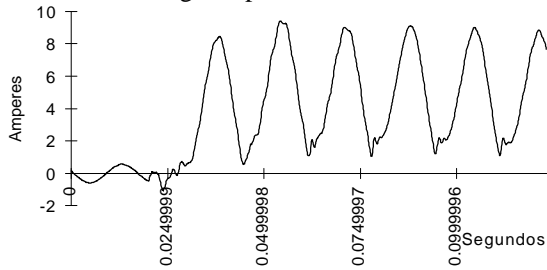


Figura 13 - Corrente de falta por S. Caxias circuito Cascavel

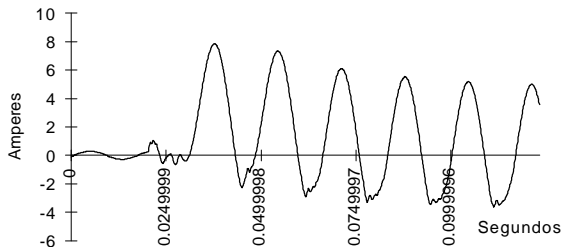


Figura 14 - Corrente de falta por Cascavel circuito S. Caxias

A Figura 15 mostra a comparação das trajetórias das impedâncias vistas pelo terminal de S. Caxias para uma falta franca e uma falta com arco. Neste caso as trajetórias seguiram direções diferentes antes de atingir a impedância de falta respectiva.

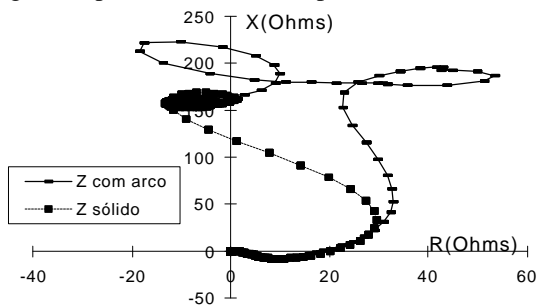


Figura 15 - Trajetórias Z para faltas franca e com arco vistas por S.Caxias.

3.0 TESTE DE MODELO⁽⁷⁾

As linhas S.Caxias-S. S.Santiago 525 kV e S.Caxias-Cascavel 525 kV possuem dois sistemas de proteção de mesmo nível hierárquico, denominados de proteção primária e proteção alternada.

A proteção primária é formada pelo relé de distância REL531 da ABB com equipamento de teleproteção FOX-20 da ABB e a proteção alternada pelo relé de distância SEL321 da Schweitzer com equipamento de teleproteção FOX-U + NSD. Ambas operando com religamento monopolar nas lógicas DUTT e POTT. Possuem também os esquemas de proteção à terra para defeitos de alta resistência e de fonte fraca. Foram montados dois painéis específicos para este testes, sendo um painel para cada terminal da linha contendo as proteções primária, alternada e teleproteção. O objetivo deste ensaio foi o de validação das proteções sob o ponto de vista de desempenho frente a faltas reais no sistema 525 kV caracterizado por possuir muitas usinas de grande porte adjacentes à linha de transmissão em análise. Foi utilizado o simulador de sistema de potência RTDS "Real Time Digital Simulator" de Furnas para fazer a transferência dos arquivos Comtrade de simulações gerados pelo ATP para os relés. Foram aplicados no total 500 disparos envolvendo faltas monofásicas, bifásicas com e sem terra e trifásicas, dentro e fora trecho da linha de transmissão. Foram também aplicados disparos de faltas com resistência de arco variável e evolutivas. As grandezas analógicas de tensão e corrente e os principais sinais de atuação de unidades dos relés bem como transmissão e recepção de sinais pelos canais de teleproteção foram monitorados pelo RTDS. As oscilografias dos relés foram também utilizadas para análises dos casos que apresentavam problemas. As principais conclusões deste teste de modelo foram:

- Devido a problemas de sobrealcance transitório, os ajustes de 1ª zona (DUTT) dos relés REL531 e SEL321 foram reduzidos para 75% da impedância da linha e o ajuste da unidade de alta velocidade (HS) do relé REL531 reduzido para 50% da impedância da linha.
- Para faltas bifásicas próximas e com alta corrente as unidades HS do relé REL531 operaram, na maioria das vezes, nas três fases.
- Pode-se observar que o relé REL531 possui a unidade de seleção de fases bastante restrita, visto que foi necessário reduzir o alcance dessa unidade na direção resistiva de 2 Ohms para 0,2 Ohms para que pudesse selecionar corretamente a fase nas faltas monofásicas e permitir o acionamento correto do religamento monopolar. A redução do ajuste desta unidade acarreta também a redução do ajuste da 2ª zona na direção resistiva em detrimento à detecção de faltas com resistências superiores a 0,2 Ohms secundário ou 2,3 Ohms primários aproximadamente.
- A unidade HS de 2ª zona foi habilitada apenas para enviar sinal de permissão para o terminal

remoto o que reduz o tempo total de atuação do esquema POTT para faltas mais severas.

- Por restrição da capacidade dos amplificadores de corrente do RTDS, todas as faltas francas próximas a fonte forte (Salto Santiago) foram submetidas a uma redução no valor de pico do primeiro ciclo através da aplicação da falta com ângulo de incidência de 90° da tensão e, nos casos mais críticos, através da introdução de resistências de falta.

4.0 TESTE END-TO-END⁽⁸⁾

Pela primeira vez na Copel, foi utilizado para fazer comissionamento no campo das proteções da linha S. Caxias-S.Santiago 525 kV, o teste “end-to-end” baseado em simulações de faltas reais, pelo ATP e injetadas diretamente aos relés por meio de simuladores de sistema de potência instalados nas extremidades da linha e disparados simultaneamente através da interface com satélite (GPS).

Sistema de Teste:

Foram utilizados 2 conjuntos trifásicos de simuladores, um para cada extremidade da linha, modelo F2253 da Doble. Foram aplicadas tensões e correntes, de aproximadamente 100 faltas, diretamente aos painéis definitivos das proteções primária e alternada da linha. A Figura 16 mostra o esquema da conexão destes equipamentos de testes.

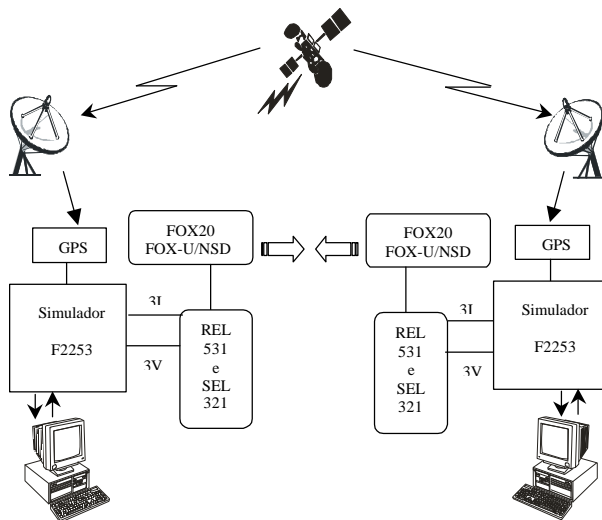


Figura 16- Esquema do teste end-to-end

As simulações de falta no ATP e a transferência para arquivos Comtrade são feitos no microcomputador PC e mediante o programa Trans II da Doble, as tensões e correntes de cada simulação são preparadas e transferidas para as memórias dos simuladores F2253

das duas extremidades da linha. Mediante sincronismo de tempo por meio de uma interface com satélite (GPS) os dois conjuntos de simuladores são disparados simultaneamente e transferidos para os relés de cada extremidade da linha as correntes e tensões como se fosse uma falta real.

Sistema de Proteção:

O teste end-to-end visou o comissionamento real do sistema de proteção antes da energização. Foi testada toda a lógica com todos os ajustes dos relés implementados e todos os equipamentos associados (disjuntores, seccionadores, etc.) em operação.

Testes de Campo:

Foram mobilizadas duas equipes de testes. Uma para cada subestação com comunicação ponto a ponto entre elas. Dos 500 disparos efetuados no simulador de Furnas, foram escolhidos em torno de 50 e gerados mais 50 disparos diferentes conforme necessidade. A Figura 17 ilustra, para o terminal de S. Caxias, a simulação da falta fase C para terra a 0% de S.Caxias. A Figura 17-(a) o resultado do ATP e a Figura 17-(b) a oscilografia do relé SEL 321.

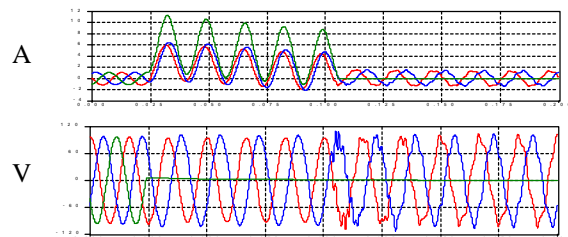
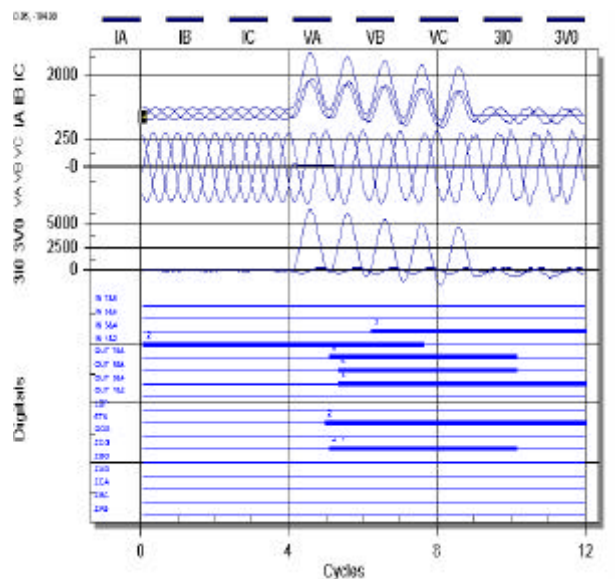


Figura 17 - (a) - Resultado do ATP



As principais conclusões do teste end-to-end foram:

- Separação dos canais de teleproteção da lógica POTT para operarem independentemente com o seu respectivo relé. Ou seja, a proteção REL531 utilizando o equipamento FOX20 e a proteção SEL321 utilizando o equipamento FOX-U + NSD.
- Implementação e programação de funções e lógicas adicionais não contempladas no teste de modelo (stub, switch-onto-fault, TTD trifásico, etc.)
- Com relação aos ensaios, ganhou-se muita experiência na manipulação dos simuladores de sistema de potência, geração de arquivos Comtrade, quantificação de ciclos de pré-falta, tempo de falta, etc.

Participantes:

Na SE S. Santiago: Yutaka Morita e Glauco B. Tolentino da Copel e Wagner de Oliveira da ABB

Na SE S. Caxias: Mauro F. Ushikubo, Eduardo Motoie, Célio Modesto e Arcélio Baschi.

Parcialmente participaram também: Da área de Proteção de Pato Branco (Anacleto, Fernando, Becker e Paulo) e da área de Cascavel (Egon e Milton).

5.0 CONCLUSÕES

Além das conclusões específicas das etapas 2 e 3 tem-se como conclusões gerais:

5.1 – ATP

A utilização do ATP para simulação de faltas em sistemas com muitas usinas de grande porte próximas é atualmente, sobre o nosso ponto de vista, o mais indicado pela sua rapidez de processamento e precisão. Como é largamente utilizado pelas companhias de eletricidade do mundo, o seu preparo pode ser feito com antecedência na própria empresa e transferido ao órgão que dispõe do simulador de sistema de potência para conversão dos resultados em valores reais e aplicação aos relés em tempo real. A utilização do ATP, também pode substituir o recurso de modelagem incorporada de alguns simuladores, com a vantagem de se economizar tempo uma vez que o simulador não ficaria indisponível durante a etapa de implementação e teste dos modelos.

5.2 – TESTE DE MODELO

Normalmente esta etapa do processo tem por objetivo a validação da proteção no que se refere ao seu funcionamento e desempenho conforme os requisitos da especificação. Foi utilizado o simulador RTDS de Furnas que embora possua capacidade de modelagem incorporada, optou-se pela modelagem no ATP, uma vez que todos os casos base já estavam devidamente testados na Copel e com detalhes que a modelagem no RTDS não suportaria. Por outro lado o RTDS

apresenta a facilidade de apresentar sinais de pré-falta permanentes e também, quando utilizada a modelagem própria, é possível fazer simulação com “loop fechado”.

5.3 – TESTE END-TO-END

Uma vez simulado pelo ATP, montado o banco de dados de faltas no formato Comtrade e dispendo-se do simulador de sistema de potência, o teste end-to-end passa a ser muito simples e de extrema importância uma vez que nesta etapa é que se faz o teste real de todas as funções e com todos os equipamentos associados. É o teste final antes da energização. Nesta etapa normalmente se deteta muitos problemas de projeto e de fiação e também se faz a otimização e eventual adequação dos ajustes dos relés.

6.0 REFERÊNCIAS

- (1) - M. F. Ushikubo, “Modelagem do Sistema Salto Caxias para utilização no simulador de sistema de potência”, Copel/CNPS N^o 20/97.
- (2) - Lj. Kojovic, M. Kezunovic, C. W. Fromen, “A new method for the CCVT performance analysis using field measurements, signal processing and EMTP modeling”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, N^o 4, Oct. 94.
- (3) - G. E. Alexander, J. G. Andrichak, W. Z. Tyska, “Relaying Short Lines”, Publicação GE, GER-3735, Malvern, Pennsylvania 19355, USA.
- (4) - J. Souza, D. Santos, M. T. Correia de Barros, “Fault Arc Modeling in EMTP”, International Conference on Power Systems Transients, IPST’95, Lisbon, 1995.
- (5) - A. T. Johns, R. K. Aggarwal, Y. H. Song, “Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems”, IEE Proc.- Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, N^o 2, March 1994.
- (6) - M. Kizilcay, T. Pniok, “Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems”, ETEP, Vol. 1, N^o 1, Jan/Feb 1991.
- (7) - Furnas, Copel e ABB, “Teste do Sistema de Proteção das LT’s Salto Caxias-Salto Santiago 525 kV e Salto Caxias-Cascavel 525 kV”, Relatório Furnas, JUL/98
- (8) - J. A. Jodice, R. Ryan (Doble Engineering Company), K. Carr (Bonneville Power Administration), “Satellite Synchronized Test Instruments replace the staged fault as the ultimate test of protections system performance”.