



Comité Nacional Paraguay



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL E DE SOBRECORRENTE DO TRANSFORMADOR QUE ALIMENTA O SERVIÇO AUXILIAR DO ELO CC DA SUBESTAÇÃO DE FURNAS

André Luiz Martinussi, Robson Almir de Oliveira, Dimas de Barros Cobra

UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná/ Furnas Centrais Elétricas

Brasil

RESUMEN

Este artigo apresenta, através de um procedimento de simulação digital, uma avaliação da proteção diferencial e de sobrecorrente do transformador do serviço auxiliar da subestação de Furnas. Foi escolhido o software ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), como ferramenta para simulação do nível de curto-circuito no barramento do transformador em estudo. Posteriormente serão simuladas condições de falta interna, energização (corrente de Inrush) e sobreexcitação, através do software ATP (Alternative Transiente Power), para verificar se o relé diferencial poderá operar de maneira indevida. A metodologia adotada trará uma contribuição para a avaliação de proteção de transformadores em geral.

PALABRAS CLAVES

Transformador de potência, proteção diferencial, proteção de sobrecorrente, relé



1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Segundo Amadeu C. Caminha (Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos) na proteção de sistemas elétricos devem ser examinados três aspectos:

1. Operação normal,
2. Prevenção contra falhas elétricas,
3. Limitação dos defeitos devido às falhas.

A operação normal presume a inexistência de falhas do equipamento, de erros de operação e de incidentes diversos.

Providências devem ser tomadas no sentido de prevenção e/ou limitação dos efeitos das falhas. Previsão de isolamento adequado, coordenação do isolamento, uso de cabos pára-raios e apropriadas instruções de operação e manutenção são algumas providências que devem ser tomadas no sentido de prevenção de falhas.

A limitação dos efeitos das falhas inclui: a limitação da corrente de curto-circuito, projeto capaz de suportar os efeitos mecânicos e térmicos das correntes de defeito, existência de circuitos múltiplos de geradores de reserva, correto releamento com suficiente capacidade de interrupção, meios de observar a afetividade das medidas do sistema (oscilografia) e freqüentes análises sobre as mudanças do sistema, (crescimento e desdobramentos das cargas) através de softwares, com os conseqüentes reajustes dos relés.

Verifica-se que o releamento é apenas uma das várias providências no sentido de minimizar danos aos equipamentos e interrupções de serviço, quando ocorrem falhas no sistema. (Davies, 1996, p.4)

Ainda segundo Amadeu C. Caminha, basicamente em um sistema encontram-se os seguintes tipos de proteção:

- Proteção contra incêndios;
- Proteção pelos relés e por fusíveis;
- Proteção contra descargas atmosféricas e surtos de manobras.

Portanto para fazer uma análise correta da proteção, levando-se em conta a seletividade, velocidade, sensibilidade e correto funcionamento do SEP, deve-se levar em contas as seguintes considerações principais:

- Natureza das faltas, sensibilidade para instabilidade, regime e características gerais dos equipamentos, condições de operação;
- Custo do equipamento principal *versus* custo relativo do sistema de proteção;



- Distancia entre los puntos de releamiento (carregamento dos TC's, uso de fio piloto), acomodação dos relés e dos redutores de medidas.

Vale frisar que um sistema de proteção minimiza o custo de reparação de estragos, o tempo de inatividade do equipamento, a propagação do defeito, perda de renda das distribuidoras de energia, etc.

Segundo Denis Vinicius Coury (Proteção de sistemas eletroenergéticos), o custo da proteção para sistemas de alta tensão é da ordem de 2-5%, correspondente ao equipamento protegido. Podendo, então, ser considerado um seguro barato, considerando-se o tempo usual para depreciação dos equipamentos.

2 INTRODUÇÃO À PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

Ao contrário de múltiplos defeitos suscetíveis de aparecer nas máquinas rotativas, os transformadores podem ser sujeitos apenas a curto-circuito interno e a proteção de retaguarda contra faltas externas. A construção dos transformadores atingiu um nível técnico muito elevado, podendo ser considerado entre os equipamentos do sistema de potência como sendo o de maior segurança de serviço. (Caminha, 1977, p.144).

Transformadores de diferentes potências e interligados a diferentes níveis de tensão devem ser equipados com diferentes relés de proteção para proteger efetivamente o transformador de diferentes tipos de faltas, tais como:

- Faltas entre fase e terra;
- Faltas entre fases;
- Faltas entre espiras;
- Faltas entre os enrolamentos de alta tensão e baixa tensão.

Transformadores de pequeno porte (menor que 5 MVA) são equipados geralmente com os seguintes tipos de proteção:

- Relé de gás (relé Buchholz);
- Proteção de sobrecarga;
- Proteção de sobrecorrente;
- Proteção de falta a terra.

Transformadores maiores (acima de 5 MVA) podem ser equipados com os seguintes tipos de proteção:

- Relé de gás (relé Buchholz);
- Proteção de sobrecarga;
- Proteção de sobrecorrente;
- Proteção de falta a terra;

- Proteção diferencial;
- Monitoramento de pressão para o comutador sob carga;
- Monitoramento da temperatura do óleo;
- Monitoramento do nível de óleo.

3 PROTEÇÃO DIFERENCIAL

Ao longo do tempo, diversas filosofias de proteção foram desenvolvidas de forma a evitar condições anormais de funcionamento dos sistemas de potência. No caso dos transformadores, utiliza-se a proteção diferencial, que consiste na aquisição das formas de onda de entrada e saída do transformador a partir de TCs acoplados em série com os ramos primário e secundário do sistema, conforme mostra a Figura 1.

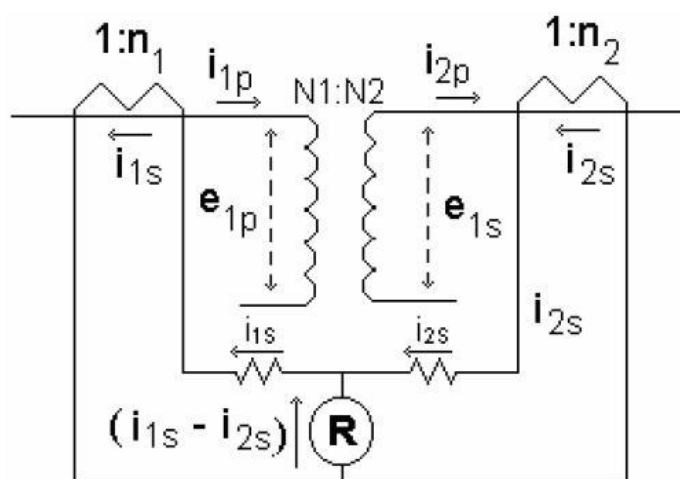


Figura 1: Esquema de proteção diferencial percentual

Em condições normais de operação e em caso de faltas externas, as correntes i_{1s} e i_{2s} (correntes de secundário dos TCs) serão iguais, desde que $N_1/N_2 = n_2/n_1$. Normalmente $N_1 \neq N_2$, isto significa que para condições normais de operação $i_{1p} \neq i_{2p}$. Porém, se utilizarmos TCs que possuam relações de transformação que obedeçam à igualdade $N_1/N_2 = n_2/n_1$, as correntes i_{1s} e i_{2s} terão mesma magnitude. Logo, pode-se definir a corrente diferencial (ou corrente de operação), i_d , como sendo:

$$i_d = i_{1s} - i_{2s}$$

No entanto, associada à configuração como um todo, têm-se várias e prováveis fontes de erros, como os das relações de transformação, dos TCs de medição a das mudanças de

tapes quando evidenciadas. Tais imprecisões podem comprometer o funcionamento do sistema de proteção, proporcionando uma atuação errônea deste, pois pequenas correntes diferenciais podem surgir em condições normais de operação. Para corrigir esses problemas se fixa uma margem de segurança a partir da qual o relé deverá atuar, as quais são dadas pelas equações abaixo:

$$i_d \geq K$$

$$i_d \geq K' \left(\frac{i_{1s} + i_{2s}}{2} \right)$$

Onde K representa a corrente mínima de operação e K' representa a inclinação percentual da característica diferencial percentual. Assim, pequenas correntes diferenciais podem ser observadas sem que o relé emita um comando de disparo.

A Figura 2 representa a característica do relé diferencial percentual, mostrando sua região de operação (trip) e de não operação (bloqueio). Esta ilustra uma característica de operação diferencial com inclinação variável, isto é, duas inclinações diferentes, sendo que o objetivo da segunda inclinação é acomodar aqueles casos de faltas externas com altas correntes passantes que poderiam causar maiores erros nas medidas e até mesmo a saturação de um dos TCs.

Tem-se que algumas manobras realizadas com o transformador, bem como para situações de faltas externas e próximas a este, fazem surgir correntes diferenciais cujos valores superam o limiar caracterizado ou margem de segurança adotada, causando uma operação indevida da proteção diferencial. A seguir são descritas algumas das principais causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas.

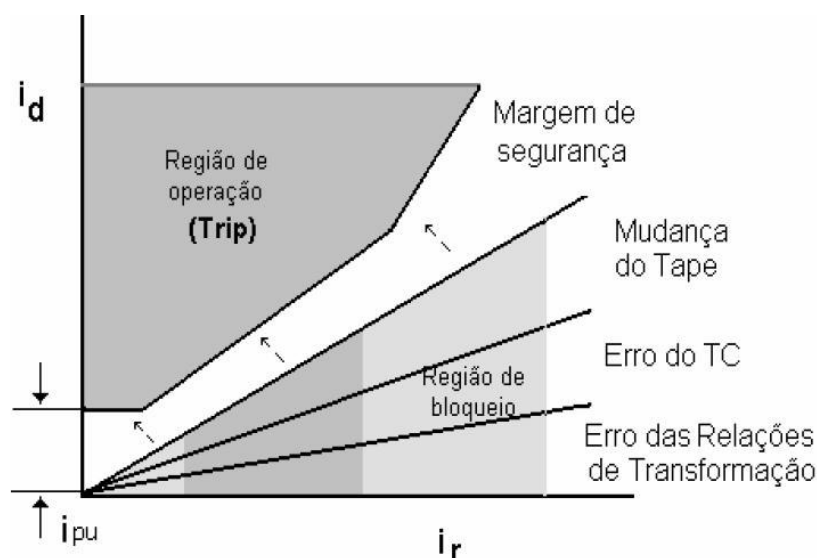


Figura 2: Característica de operação do relé diferencial percentual

3.1 Corrente de Magnetização Durante a Energização do Transformador

Estas correntes aparecem durante a energização do transformador, devido à magnetização e à saturação do seu núcleo, sendo sua magnitude determinada pela declividade da característica de magnetização na região saturada. Em modernos transformadores, altas correntes de *Inrush* podem ser observadas.

Uma vez que o secundário permanece em aberto durante a energização do transformador, a corrente diferencial atinge valores suficientemente altos, a ponto de sensibilizar o relé diferencial, causando uma operação indevida. Esta situação é caracterizada pela presença de harmônicos e com predominância de 2ª harmônica.

3.2 Sobreexcitação do Transformador

Durante rejeições de carga e outras condições de operação, o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente. Nestas condições, o transformador pode ser submetido a formas de onda distorcidas, compostas por harmônicos ímpares, particularmente de 3ª e 5ª ordem. Nesta situação, o transformador apresentará uma característica não linear, fazendo surgir correntes diferenciais não nulas e, portanto, sensibilizando a proteção diferencial de uma forma não desejada.

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

A Figura 3 mostra a representação do sistema elétrico (barramento de 500 kV da subestação da margem direita de Itaipu até o transformador de 66/13.8 kV) utilizado nas simulações de manobras e faltas consideradas para verificar os ajustes da proteção do transformador de potência em questão.

O sistema elétrico é composto por dados equivalentes de onze transformadores de potência, sendo quatro com relação 525/241/13.8 kV e potência aparente de 375 MVA, onde os terciários destes transformadores encontram-se abertos, outros quatro são transformadores reguladores de tensão em 2410 kV, com tap entre 1 e 19 (tensão no lado de alta entre 217 e 265 kV) e potência aparente de 375 MVA, dois transformadores abaixadores com a relação de 241/66/13.8 kV e potência aparente de 375 MVA, onde também os terciários estão abertos e o último com relação de transformação 66/13.8 kV e potência aparente de 7 MVA. Os dez primeiros estão localizados na subestação elevadora da margem direita (SE-MD) de Itaipu e o

último é o transformador do serviço auxiliar da subestação conversora de Furnas na cidade de Foz do Iguaçu.

Nos transformadores foram consideradas as reatâncias de sequência positiva igual ao valor das reatâncias de sequência zero, e foram desprezados os valores das resistências dos transformadores. Também foi considerado o valor da impedância da linha de transmissão, que vai da subestação da margem direita de Itaipu até a entrada do serviço auxiliar da subestação de Furnas.

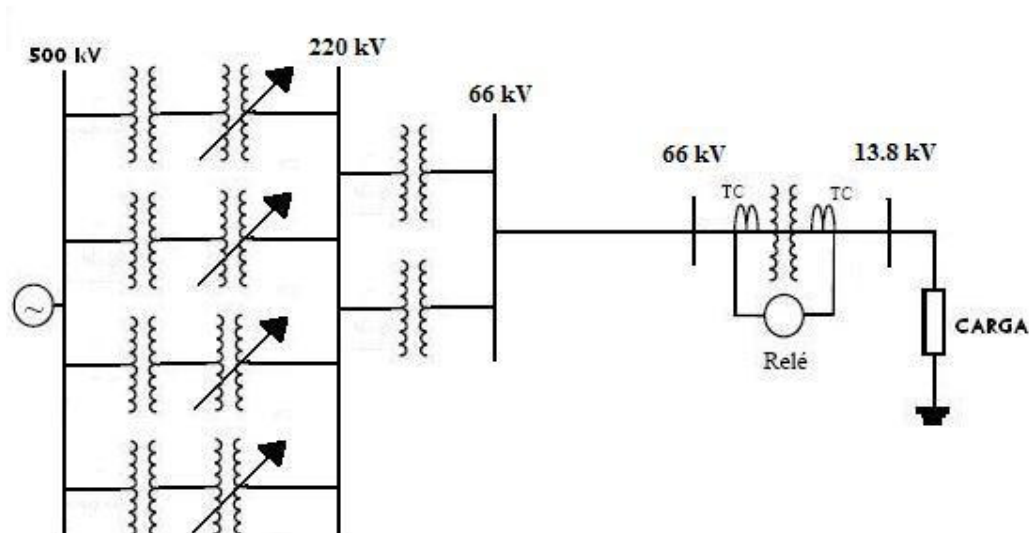


Figura 3: Representação do sistema elétrico em estudo

5 O ANAFAS

O ANAFAS é uma ferramenta para análise de faltas em sistemas elétricos de qualquer porte, permitindo a modelagem fiel do sistema (carregamento pré-falta, representação da capacitância das linhas e de cargas, etc.) e a simulação de diversos tipos de defeito, que podem ser compostos para definição de faltas simultâneas. Além disto, oferece outros serviços auxiliares como: cálculo de equivalentes de curto-circuito, análise de superação de disjuntores, diversos tipos de relatórios de dados, comparação de configurações, evolução de nível de curto-circuito, saída de resultados para o programa visualizador VISUANA e gravação de casos em formato XML para uso no programa FORMCEPEL.

O ANAFAS permiti a execução de estudos individuais, onde o usuário define cada caso; e de estudos macro, onde os casos são gerados automaticamente pelo ANAFAS; ambos com solução orientada a ponto-de-falta, cujo relatório de resultados apresenta as tensões e correntes de falta e de contribuição; e solução orientada a ponto-de-monitoração, cujo



Comité Nacional Paraguay



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

relatório de resultados apresenta o valor de grandezas definidas pelo usuário (combinação linear de medições).

O ANAFAS exige baixo custo computacional, ou seja, tem poucos requisitos de “hardware” e “software”. O desenvolvimento do ANAFAS é patrocinado pela ELETROBRÁS e suas concessionárias, que contribuem decisivamente na gestão e execução desse projeto.

5.1 Modelagem do sistema proposto

Para a modelagem de qualquer sistema, no ANAFAS, deve ser preenchido um cartão base, este cartão tem a extensão tipo “.txt”. Deve ser respeitado a posição de cada elemento dentro de sua respectiva coluna. Abaixo segue um modelo de cartão.

Os dados das impedâncias devem estar em porcentagem, e foi escolhido 100 MVA como base de potência.



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

```

SIMULACAO_ok.ANA - Notepad
File Edit Format View Help

0
P
1      1
SIMULACAO DE CURTO-CIRCUITO NO TRANSFORMADOR ZA-902 (STFI) - LI66ZA902.ANA
2      1

=====
2      2
AVALIACAO DO AJUSTE DO RELE DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR ZA-902
2      3
SERVICO AUXILIAR QUE ALIMENTA O ELO CC DA SUBESTACAO DE FURNAS
2      4

=====
38
(DADOS DE BARRAS
(NB C M      BN      VBAS DISJUN      IA
(-----
1000      MD500kV      525      1
2001 1 MID_POINT      241      1
2002 1 MID_POINT      241      1
2011      B. TERCIARIO      13.8      1
2012      B. TERCIARIO      13.8      1
3000      MD66kV      66      1
4000      STFI66kV      66      2
5000      STFI13.8kV      13.8      2
9999

37
(DADOS DE CIRCUITOS
(BF C BT NC T R1      X1      R0      X0      CN      TB TCI ADEF      KM
(-----
(EQUIVALENTE GERACAO ITAIPU 50Hz - 500kV
1000      0      G      49      16      1
(TRANSFORMADORES 500/241kV - SE MARGEM DIREITA ITAIPU
1000      1001      2585      2585      1
1000      1002      2585      2585      1
1000      1003      2585      2585      1
1000      1004      2585      2585      1
1001      1005      1948      1948      1
1002      1005      1948      1948      1
9999

```

5.2 Resultados Obtidos

Segue abaixo os resultados das correntes de curto-circuito simuladas. Foram simuladas as correntes no primário e no secundário do transformador.

Tipo de falta	Lado de alta do transformador (66 kV)	Lado de baixa do transformador (13.8 kV)
Trifásica	1824 A	8642 A



Fase-Terra	1713	7982
Bifásica	1580	7484

6 AJUSTE DO RELÉ DIFERENCIAL E DE SOBRECORRENTE

O ajuste do relé diferencial é feito através da sua potência nominal, tensão máxima e tensão mínima. O nível de curto-circuito não irá influenciar, pois ele opera de maneira percentual. No entanto devem ser escolhidos TC's conhecidos, pois se deve conhecer a corrente do primário e do secundário dos transformadores, foram escolhidos TC's da classe C400.

Para se fazer a porcentagem da restrição de operação do relé deve-se fazer simulações para conhecer as correntes de magnetização e de sobreexcitação. Este trabalho ainda não está concluído, e estas simulações serão feitas com o software ATP.

Todavia essa característica de restrição em transformadores é normalmente ajustada em 35% da corrente de operação, pois muito já foi estudado sobre corrente de magnetização e sobreexcitação e as características dessas correntes são praticamente as mesmas em todos os casos.

Portanto foram escolhidos TC's auxiliares para ajustar o relé diferencial em 35% da corrente passante pela bobina de restrição. Os dados dos relés e TC's seguem na tabela abaixo.

Lado (kV)	Tipo de ligação	Relação de transformação do TC principal	Classe do TC	Tipo do TC auxiliar	Relação de transformação do TC auxiliar	Tipo de ligação do TC auxiliar
66	Δ	600/5A	C400	SLCE 12	0.51/5A	Y/Y
13.8	Y	1000/5A	C400	SLCE 12	1.46/2.89	Y/ Δ

Considerando que o LTC no ponto mínimo corresponde a -20% e incluindo mais 10% como fator de segurança, temos que:

$$V_{\min} = 46.2 \text{ kV}$$



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

$$\Delta I = \frac{I1 - I2}{\frac{I1 + I2}{2}} * 100$$

$$I1 = Ip = \frac{S_{transf}}{\sqrt{3} * V_{min}} * n_x * n_{Mx}$$

$$I1 = Ip = \frac{7000}{\sqrt{3} * 46.2} * \frac{5}{600} * \frac{5}{0.51} = 7.15A$$

$I2 = Is = 5A$; valor calculado pelo mesmo procedimento de $I1$, mas considerando a tensão máxima.

$$\Delta I = \frac{7.15 - 5}{\frac{7.15 + 5}{2}} * 100 = 35\%$$

Portanto a corrente de operação selecionada de 35% da corrente que passa pela bobina de operação.

A proteção de sobrecorrente é feita no lado de baixa tensão, no lado de alta tensão esta proteção é feita pela proteção da linha entre Itaipu e Furnas, pois esta tem um alcance até a entrada do transformador do serviço auxiliar. Os relés de sobrecorrente das três fases e do neutro foram escolhidas com a característica muito inversa.

Os ajustes abaixo foram escolhidos considerando a seletividade com as cargas abaixo deste barramento, seguindo normas de Furnas, foi considerada a corrente de falta de 8642 A conforme simulado pelo software ANAFAS, e para a seletividade a operação deve ocorrer num tempo menor a 0.8 s.

Ajustes Selecionados:

50/51 – TC:600/5

$I_n = 1 A$

$I_{>} = 4 * I_n$

$k=0.5s$

50/51N – TC:200/5

$I_n = 2,5 A$

$I_{>} = 2 * I_n$

$k=0.5s$



Comité Nacional Paraguay



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

|>>=∞

|>>=∞

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ANAFAS – ANÁLISE DE FALTAS, Manual do usuário, versão 4.3, 2006
- [2] ASEA PROMON – HVDC CONSORTIUM, Technical report of Itaipu HVDC System
- [3] ASEA PROMON – HVDC CONSORTIUM, Technical guide – Differential Relay
- [4] ASEA PROMON – HVDC CONSORTIUM, Technical manual – RADSE Relay
- [5] CAMINHA, A. C. – Introdução à proteção dos sistemas elétricos, São Paulo, Edgar Blucher Ltda, 1977.
- [6] CORY, D. V. – Proteção de sistemas eletroenergéticos, Apostila disponibilizada pela SEL (Schweitzer Engineering Laboratories) , 2003.
- [7] DAVIES, T. C. – Protection of Industrial Power Systems, Second edition, Editora Newnes, 1996.
- [8] HOROWITZ, S. H. e PHADKE, A. G. – Power System Relaying, John Wiley and Sons Inc., 1992.
- [9] SEL – 387A, Current Differential Relay – Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, USA.
- [10] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION – RELAY INSTRUMENT DIVISION, Applied Protective Relaying – Instruction Manual, 1976