



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/02
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TC EM CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICAS COM ENFOQUE NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS – PANORAMA ATUAL E REFINAMENTO DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

T. S. de Carvalho (*) R. S. Moretti R. Antunes G. B. Fabris F. E. Spressola R. G. de Oliveira
ALSTOM GRID ELETROSUL ELETROSUL ELETROSUL ALSTOM GRID ALSTOM GRID

R. S. Salengue J. F. P. Vaniel R. O. C. da Silva W. R. C. Grande

RESUMO

Visando contribuir com os estudos de superação de equipamentos do sistema elétrico, este artigo avalia o impacto da saturação do TC na proteção diferencial de barra.

Curto-circuitos foram simulados variando-se o nível de saturação do TC e/ou introduzindo entreferro. A partir das respostas foram realizados ensaios de faltas aplicadas através de mala de testes verificando-se o desempenho dos relés.

Os resultados mostram que há diferenças significativas nos algoritmos dos relés quando submetidos a correntes saturadas. Alguns casos indicam a possibilidade de otimização do TC e prolongamento da vida útil dos equipamentos em campo, sem prejuízo ao funcionamento da proteção.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Corrente, Proteção Diferencial de Barra, Superação, Saturação, Desempenho Transitório.

1.0 - INTRODUÇÃO

A superação de equipamentos nos sistemas elétricos de potência tornou-se um tema de grande relevância tendo em vista a elevada quantidade de instalações existentes com idade avançada e as transformações ocorridas na rede devido ao crescimento da demanda e dos níveis de curto-circuito.

Com o objetivo de orientar os Agentes de Transmissão quanto à superação de equipamentos existentes na Rede Básica e nas Demais Instalações de Transmissão (DIT's), bem como, desenvolver metodologias padronizadas para identificação das mesmas, o Operador Nacional em conjunto com os Agentes do Setor Elétrico criaram os Grupos de Trabalho para Análise da Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS) (1).

Para Transformadores de Corrente, a metodologia proposta pelo GT-AS considerou como possibilidades de abordagem: a suportabilidade frente a correntes de regime permanente e curto-circuito e a análise do desempenho do sistema de proteção (TC + relé) considerando a saturação do núcleo em situações de curto-circuito com base na norma IEC 60044-6 (2).

Os projetos dos sistemas de proteção baseiam-se nas normas técnicas disponíveis para estes sistemas, que por sua vez não estão associadas às normas de TC. Dessa forma, não há avaliação conjunta do desempenho do sistema "relé e TC". Esta falta de vínculo entre as normas pode resultar em exagerado dimensionamento dos TC, com núcleos desnecessariamente majorados, ou até mesmo comprometer o desempenho dos sistemas de proteção. Este conteúdo tem sido discutido no comitê IEC/TC 38 e será abordado no guia de aplicação de TC em proteção do sistema de potência IEC TR 61869-100 (3), que está em fase final de emissão. Este guia é um documento complementar da norma IEC 61869-2, a qual substituiu as normas IEC 60044-1 e 60044-6.

(*) Av. Nossa Senhora da Piedade, n° 1021 – Engenharia ITR – CEP 37.504-358 Itajubá, MG – Brasil.
Tel: (+55 35) 3629-7000 – Fax: (+55 35) 3629-7007 – Email: tulio.sallum@alstom.com

O presente trabalho aborda o modelo de TC em ATP (*Alternative Transients Program*), validado em (4) a partir de resultados de ensaios reais, e um modelo equivalente de um sistema elétrico de potência escolhido. Em seguida apresenta algumas características da proteção diferencial de barra, enfatizando possíveis diferenças entre os algoritmos existentes. Logo, alguns projetos de TC são selecionados para simulações e ensaios. Finalmente, resultados de ensaios práticos com aplicações de faltas em relés de proteção diferencial de barra através de mala de teste são apresentados e discutidos.

A proteção diferencial de barra foi selecionada para o presente estudo pois os danos no sistema elétrico decorrentes de uma atuação indevida ou demora de atuação são muito graves. Esta falha de proteção afeta todas as linhas conectadas à barra, causando impactos significativos no sistema elétrico de potência.

2.0 - MODELAGEM DO SISTEMA

A escolha de representar a barra de Campos Novos 230kV, se deve ao fato de esta possuir um dos maiores curtos-circuitos do sistema da Eletrosul, além de ter um elevado X/R por estar próximo de geradores. Parte do sistema e seu modelo pode ser visualizado na figura 1a, em destaque.

A fim de simplificar o estudo da proteção diferencial, foi calculado o sistema equivalente da linha de transmissão Campos Novos – Barra Grande 230kV, onde se obteve as impedâncias vistas da barra de Campos Novos 230kV, da barra de Barra Grande 230kV e de transferência entre as duas barras. Através deste equivalente (figura 1b), a barra de Campos Novos está conectada apenas em dois circuitos: primeiro com o TC considerado no estudo como ideal, do lado do equivalente; segundo com o TC modelado de forma a fornecer corrente saturada, do lado da linha. A proteção diferencial de barras receberá, através da mala de testes, as correntes dos dois circuitos provenientes das simulações deste sistema.

O sistema escolhido foi modelado através do software ATP por uma linha de transmissão de parâmetros distribuídos, e por impedância concentrada para os equivalentes elétricos nas extremidades e para a impedância de transferência entre as barras (figura 1b). Os valores de curto-circuito foram comparados com um caso oficial de curto-circuito do ONS de 2013 (BR1312PT), comprovando que a modelagem está representando de maneira satisfatória o sistema real.



O TC atualmente instalado nesta barra, de fabricação da Alstom, foi modelado como apresentado em 2.1, levando-se em consideração os dados de projeto para sua resistência secundária e curva de magnetização. A impedância do cabo ligado ao secundário do TC foi levantada a partir de seu modelo e da distância entre TC e Relé. A resistência de carga do relé foi determinada a partir de seu manual.

2.1 Modelagem do TC

A figura 2 abaixo mostra o modelo utilizado:



Sendo:

- R1, L1: Resistência e indutância lineares representativas do sistema ligado ao primário do TC;
- Transformador Ideal: Transformador monofásico ideal que possui como entrada apenas a relação de transformação, não possui indutância interna, nem saturação. É um modelo baseado em um arranjo de resistências;
- Lm: Indutância saturável do ramo magnetizante (Type 98), a entrada de dados provém da curva Tensão x Corrente (em rms) fornecida pelo fabricante e convertida para Fluxo Enlaçado x Corrente (pico) através da rotina SATURA do ATP. Seu modelo é constituído por setores lineares de indutâncias ("piecewise linear") e sua lógica é baseada em um arranjo de indutores em paralelo. Esta indutância não leva em consideração a histerese do núcleo ferromagnético, e pode ser utilizada para casos em que este fenômeno não é relevante para o estudo.
- R2: Resistência secundária linear, interna ao TC;
- Rc e Lc: Resistência e indutância lineares da carga conectada aos secundários do TC.

A entrada de dados da curva V_{xl} do indutor L_m influencia significativamente a resposta do TC, desta forma duas recomendações são importantes para o bom funcionamento do modelo: Limitar o número de pontos para representar a curva de saturação a fim de evitar instabilidades numéricas, considerando neste conjunto os pontos necessários para caracterizar a região de saturação de forma adequada, e acrescentar um ponto, após o último medido, com corrente 10 vezes maior e tensão aproximadamente igual, para garantir a extrapolação da curva de magnetização com baixa inclinação.

A indutância de dispersão do secundário tem um efeito desprezível, uma vez que os enrolamentos secundários são considerados uniformemente distribuídos em um núcleo toroidal.

O modelo foi validado por comparação, em (4), para curtos-circuitos simétricos e assimétricos utilizando-se como referência ensaios reais realizados no CEPEL/RJ (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

3.0 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRA

3.1 Definição

A proteção diferencial de barra tem como princípio básico de funcionamento a primeira lei de Kirchhoff, que determina que a soma das correntes em um nó (ou barra) é igual a zero.

Como exemplo, há dois circuitos conectados a uma barra. Pela lei de Kirchhoff, a soma das correntes destes circuitos deve ser zero (figura 3a). Um valor diferente de zero, indica que há uma corrente de fuga não medida, denominada corrente diferencial (figura 3b) ou de operação.

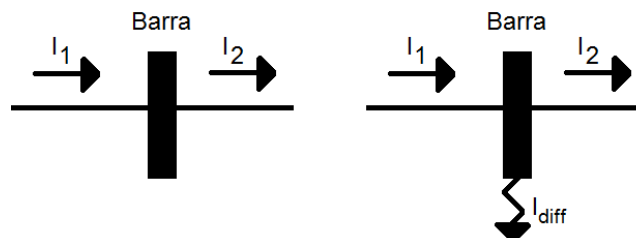


Figura 3a – Barra sem defeito – 3b Barra com defeito

Na figura 3b acima, I_1 representa a corrente que entra no equipamento protegido, I_2 a corrente que sai e I_{diff} é a corrente diferencial calculada pela proteção conforme equação abaixo:

$$I_{diff} = I_1 - I_2 \quad (\text{Eq.01})$$

Quando o sistema protegido está sem defeito não há corrente diferencial pois I_1 é igual a I_2 , porém quando houver um defeito na barra, as correntes I_1 e I_2 alteram seus ângulos e módulos e ocorre um aumento significativo da corrente I_{diff} , possibilitando sua detecção e atuação da proteção.

Entretanto, existem fenômenos relacionados aos TC, os quais prejudicam a reprodução da forma de onda da corrente primária no secundário, gerando um aumento da corrente diferencial sem a ocorrência de um curto-circuito na barra, fazendo com que a proteção diferencial atue indevidamente. Tais fenômenos podem estar relacionados a erros intrínsecos ao TC e agravados com curto-circuitos externos à barra que geram um aumento neste erro devido a saturação de seu núcleo magnético.

Para solucionar parte deste problema de modo a proporcionar uma elevada sensibilidade à faltas internas e um fator de segurança para faltas externas, a maioria dos relés diferenciais são do tipo diferencial percentual (5). É

uma característica desta proteção o aumento da corrente de restrição a uma taxa percentual ao valor da corrente de operação (corrente diferencial), aumentando a estabilidade quando houver divergências entre a corrente primária e secundária do TC (6) (figura 4).

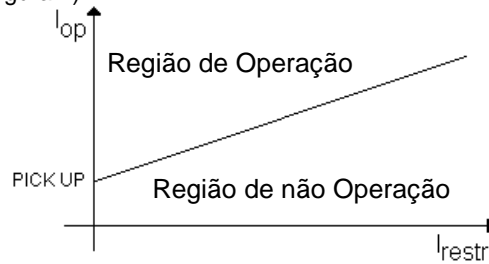


Figura 4 – Princípio de Funcionamento Proteção Diferencial Percentual

3.2 Diferenças no Algoritmo entre Relés de Fabricantes Distintos

Os resultados de estudos envolvendo mais de uma tecnologia de relés devem ser analisados cuidadosamente pois existem vários algoritmos diferentes para o cálculos das correntes diferenciais e tomadas de decisão, o que justifica a diferença nos resultados encontrados no item 4.2. A intenção deste item é mostrar algumas diferenças entre algoritmos de processamento de sinais e ajuste de relés que podem impactar em sua performance.

A corrente diferencial é obtida a partir das correntes amostradas dos circuitos através de diferentes técnicas de processamento de sinais, tais como a utilização de filtros de Fourier, filtros cossenos e etc, ou sem filtro, dependendo da abordagem adotada pelo fabricante de relé.

Outro fator de grande impacto é o cálculo da corrente de restrição, que depende da abordagem de cada fabricante. As equações 02 e 03 apresentam exemplos de como esta corrente pode ser calculada.

$$I_{RESTRIÇÃO} = MAX(|I_{Circ_1}|, |I_{Circ_2}|, \dots, |I_{Circ_N}|) \quad (\text{Eq. 02})$$

$$I_{RESTRIÇÃO} = \frac{|I_{Circ_1}| + |I_{Circ_2}| + \dots + |I_{Circ_N}|}{k} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde k é uma constante definida pelo fabricante e $I_{Circ_1, 2, N}$ corresponde às correntes dos circuitos 1, 2, N.

3.3 Métodos de Prevenção de Atuação Indevida para Faltas Externas à Barra

Os relés de proteção podem atuar indevidamente para faltas externas quando ocorre saturação do TC. Para estes casos, existem algoritmos para detectá-la e impedir a atuação incorreta da proteção diferencial de barras. Há diversos métodos para esta detecção, sendo três apresentados a seguir: o primeiro é identificar um defeito externo e bloquear a função diferencial por um tempo determinado, o segundo é identificar a saturação e também bloquear a função diferencial, e o terceiro é reconstruir a forma de onda quando determinada a saturação. Os fabricantes de relés de proteção podem utilizar de uma destas maneiras ou combinações, contudo o algoritmo é geralmente propriedade intelectual do fabricante do relé.

3.3.1 Detecção de Defeitos Externos

Este método consiste em bloquear a operação do relé assim que uma falta externa for identificada. Para curtos-circuitos no qual a corrente do TC leva mais de 1 ciclo para saturar, o relé possui tempo suficiente para processar o sinal e identificar o defeito externo. Entretanto, há casos nos quais a saturação ocorre no primeiro ciclo, e a proteção deve utilizar as correntes próximas ao zero para determinar se o defeito foi externo ou não (cálculo da corrente diferencial), sendo necessário uma lógica de rápida atuação. É possível, no exemplo da figura 5, observar que a corrente satura próximo ao pico da onda. Neste caso, poucas amostras logo após a passagem por zero da forma de onda de corrente são suficientes para identificar onde foi o defeito.

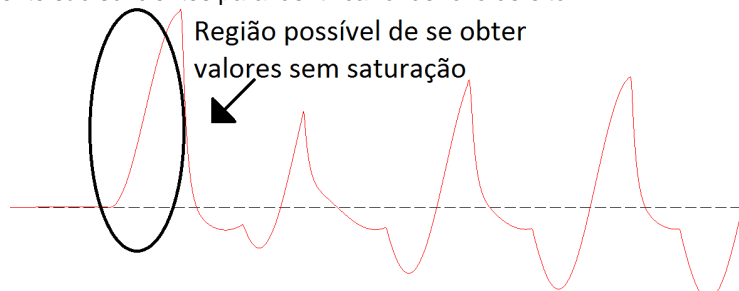


Figura 5 – Região possível de se obter amostras sem saturação

3.3.2. Detecção da Saturação

A existência de alto conteúdo harmônico na corrente secundária do TC pode indicar saturação de seu núcleo. Para estes casos, a função de proteção diferencial é bloqueada. A desvantagem deste algoritmo é a necessidade de aquisição de um ciclo completo da onda para decomposição dos harmônicos e identificação da saturação.

3.3.3. Reconstrução da Forma de Onda

Como geralmente não há saturação do núcleo para os valores de corrente próximos ao zero da onda, é possível estimar a forma de onda completa sem saturação com apenas algumas amostras. Há algoritmos que utilizam amostras sãs próximas ao início e ao fim da saturação (7) e (8).

4.0 - ENSAIOS NO RELÉ DIFERENCIAL DE BARRA

O objetivo desta etapa do estudo é analisar o desempenho de distintos algoritmos de relés frente a um mesmo curto-circuito sob diferentes condições de saturação do TC, além de observar a influência do entreferro no núcleo. Estas faltas geradas através do software ATP foram exportadas em arquivos numéricos e inseridas em uma mala de testes a qual faz a leitura do arquivo reproduzindo as formas de onda de corrente que são aplicadas ao relé, simulando uma operação em campo. O processamento do relé foi registrado e sua performance avaliada.

4.1 Escolha das Faltas e TC

As faltas foram escolhidas de maneira a verificar se há atuação correta da proteção diferencial de barras, devendo atuar para faltas na barra e não atuar para faltas externas a ela. Foram selecionadas, em sua maioria, faltas externas à barra, logo após o TC2 (figura 1b), no início da LT Campos Novos – Barra Grande 230kV (SE Campos Novos), onde existe maior possibilidade de erro do relé devido a saturação.

Como as faltas simuladas externas à barra ocorreram em uma linha de transmissão com religamento automático, este foi contemplado nas simulações, agravando, em alguns casos, a saturação no TC da linha. Para permitir uma análise mais completa, algumas faltas foram repetidas com tempo morto diferente (tempo entre a abertura do disjuntor na falta até o fechamento do mesmo). Três diferentes condições foram estudadas: a primeira com tempo morto de 300ms, a segunda com 900ms, e a terceira com 2900ms.

Todas as faltas possuem assimetria de 100%, ou seja, ocorreram próximas ao zero de tensão do sistema e apenas curtos-circuitos monofásicos foram aplicados, uma vez que defeitos trifásicos e bifásicos mascaram a avaliação de operação do relé frente a ondas saturadas. Isto ocorre porque não é possível que todas as fases estejam com a máxima assimetria no momento do defeito, devido a sua defasagem angular. Assim a fase com menor saturação permite uma mais fácil detecção do curto-circuito pela proteção.

Inicialmente as simulações foram realizadas considerando o modelo ideal (sem saturação) para o TC1 e o modelo real (representativo do TC em campo) para o TC2. Em seguida, foram modelados novos projetos para o TC2, variando-se a seção do núcleo de 75%, 50%, 25% e 10% do TC original, mantendo-se o TC1 ideal. Isto foi feito com o intuito de aumentar a saturação no núcleo, piorando a resposta do secundário do TC2 de maneira a aumentar a corrente diferencial lida pelo relé, a fim de testá-lo em condições mais críticas. A seguir, foram realizados ensaios inserindo-se entreferro no núcleo do TC2 para 100%, 75%, 50%, 25% e 10% da seção original, com o intuito de comparar-se o desempenho de TC com e sem entreferro. Em faltas internas à barra as correntes passantes pelos TC se direcionam ao ponto de defeito, isto é, a própria barra, o que aumenta bruscamente a corrente diferencial e facilita a atuação correta do relé. Por isso apenas um caso de falta na barra foi simulado. Um resumo das aplicações de faltas é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das Aplicações

Nome do Caso	Dados TC			Sistema			
	Presença Entreferro TC2	% Seção Núcleo TC1	% Seção Núcleo TC2	Tipo de Falta	X/R	Assimetria %	Operação Esperada
S1	Sem	Ideal	100	Externa	17	100	Não Operar
S2	Sem	Ideal	75	Externa	17	100	Não Operar
S3	Sem	Ideal	50	Externa	17	100	Não Operar
S4	Sem	Ideal	25	Externa	17	100	Não Operar
S5	Sem	Ideal	10	Externa	17	100	Não Operar
S6	Sem	75	50	Externa	17	100	Não Operar
S7	Sem	Ideal	100	Interna	17	100	Operar
C1	Com	Ideal	100	Externa	17	100	Não Operar
C2	Com	Ideal	75	Externa	17	100	Não Operar
C3	Com	Ideal	50	Externa	17	100	Não Operar
C4	Com	Ideal	25	Externa	17	100	Não Operar
C5	Com	Ideal	10	Externa	17	100	Não Operar

A escolha das faltas da Tabela 1 também levou em conta o tempo de linearidade (Δt), isto é, o tempo que decorre entre o início do curto-circuito até o momento em que a corrente no secundário começa a se deformar devido a saturação do núcleo. Durante este tempo o relé recebe a leitura da corrente secundária muito próxima ao valor da corrente primária dividido pela relação de transformação. Após este tempo o TC entra em saturação fazendo com que a corrente secundária não represente adequadamente a corrente primária, conforme ilustrado nas figuras 6, 7a e 7b.

Na Figura 7a é apresentada a forma de onda da corrente secundária para o caso C1. Percebe-se que tanto para a falta como para o religamento sob falta a forma de onda da corrente é muito parecida. Isso ocorre devido ao entreferro, que desmagnetiza o núcleo para o religamento.

Na Figura 7b, as correntes secundárias dos casos C1, C3 e C5 são apresentadas em detalhe, no momento da primeira falta. Nota-se que para o caso C1 o tempo de linearidade é maior do que para o caso C3, que é maior do que para o caso C5. Isto acontece por que a diferença principal entre os casos é a seção do núcleo. Para um mesmo valor de corrente primária, quanto maior esta seção, maior é o tempo que o núcleo leva para saturar (tempo de linearidade).

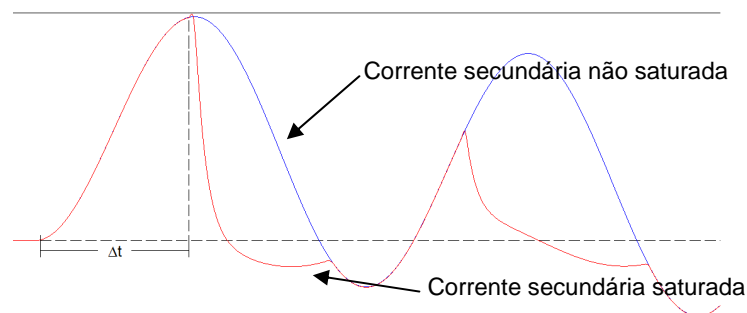


Figura 6 – Comparação entre correntes secundárias saturada e não saturada.

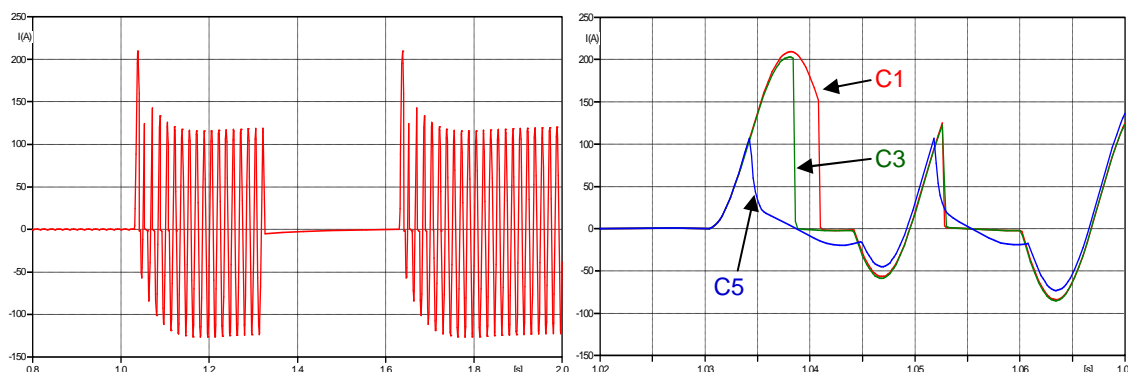


Figura 7a – Corrente secundária caso C1 – 7b Corrente secundária caso C1, C3 e C5, em detalhe.

A Tabela 2 foi elaborada com o intuito de mostrar o tempo de linearidade de cada falta simulada, levando-se em conta as diferenças de tempo morto. Pode-se perceber que há uma coerência nos valores obtidos na simulação:

- O tempo de linearidade da corrente secundária diminui com a redução da seção do núcleo, quanto menor o núcleo, menor a seção para passagem do mesmo fluxo magnético por ele, aumentando a densidade de fluxo e, por consequência, atingindo mais rápido a saturação.
- Nos casos sem entreferro (S1 a S6), ao fazer uma comparação entre o tempo de linearidade do primeiro defeito e o religamento automático sob defeito, observa-se sempre que o defeito no religamento possui tempo de linearidade menor. Observa-se também que quanto menor é o tempo morto, menor o tempo de linearidade no religamento.
- Para os casos com entreferro (C1 a C5), o tempo de linearidade do primeiro curto-circuito e do religamento automático sob defeito são praticamente os mesmos. Isso acontece por que nestes casos, o religamento ocorre em uma condição de baixo fluxo residual, aumentando o tempo de linearidade da corrente.
- O tempo morto tem influência no tempo de linearidade da corrente do religamento sob falta, pois seu aumento resulta em maior desmagnetização do núcleo, elevando-se o tempo de linearidade da corrente secundária.

De um modo geral espera-se que o desempenho dos relés seja melhor para os maiores tempos de linearidade da corrente.

Tabela 2 – Resumo Tempo de Linearidade da Corrente Secundária dos TC

Nome do Caso	Tempo Morto 300ms		Tempo Morto 900ms		Tempo Morto 2900ms	
	Falta (ms)	Religamento sob falta (ms)	Falta (ms)	Religamento sob falta (ms)	Falta (ms)	Religamento sob falta (ms)
S1	25,1	7,1	-	-	-	-
S2	9,5	2,5	-	-	-	-
S3	7,6	2,7	7,6	3,9	7,7	5
S4	5,5	2,5	5,5	3,3	7,6	5
S5	3,7	2,3	3,7	2,7	3,7	3,6
S6	7,7	3,1	-	-	-	-
S7	N/A*	N/A*	-	-	-	-
C1	10,3	10,1	10,3	10,2	10,3	10,2
C2	9,1	9,1	9,1	9	-	-
C3	-	-	7,9	7,8	7,9	7,8
C4	5,5	5,3	5,5	5,4	-	-
C5	4,1	4,1	-	-	4,1	4

NOTA: * - Não aplicável para falta interna. O objetivo principal do trabalho é avaliar as faltas externas sujeitas a diferentes níveis de saturação de corrente.

4.2 Resultados do Ensaio

A tabela 3 mostra os resultados das aplicações das correntes geradas no ATP, conforme item 4.1, em 3 relés de proteção diferencial de barra de algoritmos distintos.

Tabela 3 – Resultados do Desempenho dos Relés

Nome do Caso	Operação Esperada	Relé #1			Relé #2			Relé #3		
		Tempo Morto 300ms	Tempo Morto 900ms	Tempo Morto 2,9s	Tempo Morto 300ms	Tempo Morto 900ms	Tempo Morto 2,9s	Tempo Morto 300ms	Tempo Morto 900ms	Tempo Morto 2,9s
S1	Não Operou	Não Operou	-	-	Não Operou	-	-	Não Operou	-	-
S2	Não Operou	Não Operou	-	-	Não Operou	-	-	Operou	-	-
S3	Não Operou	Operou	Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Operou	Operou	Não Operou
S4	Não Operou	Operou	Operou	Não Operou	Operou	Não Operou	Não Operou	Operou*	Operou*	Não Operou
S5	Não Operou	Operou	Operou	Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Operou*	Operou*	Operou**
S6	Não Operou	Não Operou	-	-	Não Operou	-	-	Não Operou	-	-
S7	Operou	Operou*	-	-	Operou*	-	-	Operou*	-	-
C1	Não Operou	Operou	Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou	Não Operou
C2	Não Operou	Operou	-	-	Não Operou	-	-	Não Operou	Não Operou	-
C3	Não Operou	-	-	Não Operou	-	Não Operou	Não Operou	-	Não Operou	Não Operou
C4	Não Operou	Operou	-	-	Não Operou	Não Operou	-	Operou*	Operou*	-
C5	Não Operou	Operou	-	Não Operou	Não Operou	-	Não Operou	Operou*	-	Operou**

Nota 1: Todas as operações dos relés sem indicação de “*” ou “**” ocorreram apenas no religamento sob defeito;

Nota 2: * - Operação ocorreu na falta e no religamento sob defeito;

Nota 3: ** - Operação ocorreu apenas na falta.

O resultado esperado para o correto funcionamento da proteção diferencial de barras para defeitos externos é a **não** operação. Nestas faltas, o desempenho do relé está relacionado ao algoritmo de detecção de saturação e/ou de falta externa, podendo ou não tomar a decisão de bloquear seu disparo.

Para a primeira falta (antes do religamento) todos os relés apresentaram algoritmos com capacidade de detecção de faltas externas frente às ondas saturadas, sendo que o #1 e #2 bloqueou a operação do relé para todos os casos e o #3 não bloqueou sua operação apenas para o caso de 25% da seção original do núcleo do TC. Agora, para as faltas após o religamento automático os resultados indicaram uma grande diferença nas respostas dos três relés ensaiados, o que comprova a existência de algoritmos diferentes para a detecção de saturação. É perceptível também a influência do tempo de linearidade (tabela 2) na performance dos mesmos, ou seja, ondas com maiores níveis de saturação ocasionaram atuação dos relés para faltas externas.

Após religamento automático sob defeito, os algoritmos #2 e #3 apresentaram uma boa resposta frente a ondas saturadas. Para o algoritmo do relé #2 sua operação ocorreu no caso de falta interna (S7) e falta externa com um TC com 25% da seção original (S4), para o relé #3 sua operação ocorreu para o caso de falta interna (S7) e de falta externa com um TC com 75% da seção original (S2). No caso do algoritmo do relé #1, exceto para os casos S1 e S2, ocorreram atuações para os tempos mortos de 300ms e 900ms, deixando de atuar apenas para o tempo de 2900ms. Este relé de proteção possui um algoritmo que se houver uma nova atuação de proteção junto com uma nova detecção de saturação antes de 1,0 segundo do último defeito (dado de catálogo), esta proteção

desconsiderará o algoritmo de saturação, e a proteção irá operar. Por este motivo, ocorreram operações para o religamento sob defeito apenas para os casos com tempo morto de 300ms e 900ms.

De uma forma geral, para faltas externas, não ocorreu a operação dos relés #1, #2 e #3 para todas as correntes com tempos de linearidade maiores que 10.2 ms, 2.5ms e 5.5ms, respectivamente. Na maior parte destas operações observa-se que houve um certo nível de saturação na corrente secundária, o que mostra que há um limite, abaixo do qual, a saturação do TC não impacta na performance do relé, possibilitando em alguns casos a otimização do TC sem prejuízo ao correto funcionamento da proteção. Para tempos de linearidade inferiores a estes, houve casos de atuação, dependendo da presença de entreferro e duração do tempo morto do religamento automático (sob defeito).

5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos dos ensaios práticos comprovam que os relés apresentam melhor desempenho para maiores tempos de linearidade da corrente secundária. A redução dos tempos de linearidade é interessante para otimização do TC e prolongamento de vida útil dos atuais equipamentos em campo, mas somente é viável se os relés de proteção possuírem algoritmos e técnicas de tratamento de sinais adequadas a condições de saturação. Como cada fabricante possui sua própria tecnologia, o desempenho dos relés varia muito para uma mesma falta e mesmo tempo de linearidade.

Para faltas externas, o algoritmo do relé #2 acionou a proteção apenas no religamento automático sob defeito com TC projetado com 25% da seção do núcleo original, o que possibilita uma acentuada otimização do TC, sem prejuízos ao correto funcionamento da proteção. O algoritmo do relé #1 acionou a proteção de barra para várias situações de religamento automático com curto-circuito permanente, o que impossibilita a otimização do TC para estes casos. Porém, se for possível garantir no projeto de proteção da subestação um tempo morto superior a 1 segundo somado a um tempo de coordenação entre relés de proteção (normalmente superior a 200ms), a otimização do TC tornar-se-á possível.

Contudo, a garantia de funcionamento correto dos relés frente a ondas saturadas provenientes de TC otimizados somente é possível com algum vínculo entre as especificações técnicas dos equipamentos envolvidos. Sugere-se neste trabalho, que o parâmetro comum de especificação entre as normas de TC e de relé seja o tempo de linearidade, podendo ser representado pelos tempos $t_{al'}$ ou $t_{al''}$ da norma (2). A norma de TC requer para a especificação do equipamento, que sejam informados dados do sistema, tais como, X/R, nível de curto-circuito, carga, tempo morto, etc.. De posse destes parâmetros o fabricante pode projetar um TC para atender um determinado tempo de linearidade ($t_{al'}$ ou $t_{al''}$). Do ponto de vista dos relés, os mesmos deveriam operar corretamente para um determinado tempo de linearidade para qualquer função (diferencial, distância, etc) e independente de quaisquer parâmetros do sistema. Seu desempenho pode ser atestado a partir de ensaios sob condições de faltas pré-definidas a serem injetadas nos mesmos.

Portanto, devido a sua complexidade, o sistema pode ser analisado em duas partes: 1 - Sistema Elétrico + TC; 2 - Relé + Faltas pré-definidas. Sendo que o elemento de ligação seria o tempo de linearidade, que está presente em ambas as partes, na especificação do TC e nas faltas pré-definidas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente, 2005.
- (2) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance. IEC 60044-6, 1992.
- (3) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Guide for Application for Current Transformer in Power System Protection. IEC 61869-100 TR.
- (4) MORETTI, R.S., ANTUNES. R., CARVALHO, T.S., OLIVEIRA, R.G., SPRESSOLA, F.E., FABRIS, G.B., SALENGUE, R.S., VANIEL, J.F.P. Análise de Superação de TC Quanto ao Desempenho em Correntes Assimétricas de Curto-Circuito – Panorama Atual e Refinamento de Especificações Técnicas; XV ERIAC (Encontro Regional Íbero Americano do CIGRÉ), 2013.
- (5) BLACKBURN, J.LI., DOMIN, T.J. Protective Relaying – Principles and Applications. Third Edition. CRC Press. 2007.
- (6) A.R. VAN C. WARRINGTON. Protective Relays – Their Theory and Practice. Volume Two. Third Edition. Chapman And Hall. 1977
- (7) SANTOS, E.M., FARIAS, P.E., CARDOSO Jr., G., GUARDA, F.G.K., STEFANELLO, N., STEFANELLO, F. Compensação dos Efeitos Causados pela Saturação dos Transformadores de Corrente por Meio da Utilização de Parâmetros de Curvas e Terceira Derivada. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2010, São Paulo. T&D 2010, 2010.
- (8) J. PAN, K. VU e Y. HU. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.19, pp. 1623-1628, Outubro 2004.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Túlio Sallum de Carvalho, nascido em São Lourenço/MG no ano de 1987. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá em 2009, cursa mestrado na mesma área e universidade. Atualmente trabalha na Alstom Grid no setor de pesquisa & desenvolvimento de transformadores para instrumento, linha de alta tensão.

Rhafael de Souza Moretti, nascido em Criciúma/SC, Brasil, no ano de 1980.

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2004.

Mestrado em Eletrônica de Potência pelo INEP / Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2007. Atualmente trabalha na Eletrobras Eletrosul na divisão de Engenharia Eletromecânica e Civil com foco em transformadores de instrumentos.

Giovanni Baptista Fabris, nascido em Criciúma/SC, no ano de 1979. Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Santa Catarina UFSC (2002) e Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica UFRJ (2005). Exerce a função de Engenheiro de Estudos do Sistema Elétrico de Potência na Divisão de Proteção e Estudo do Sistema (DPES), do Departamento de Operação do Sistema (DOS), da ELETROBRAS ELETROSUL, desde 2002.

Ricardo Antunes, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 1999.

Mestrado em Eletromagnetismo pelo GRUCAD / Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2002.

Engenheiro na área de Estudos Elétricos de Operação da ELETROSUL – a partir de 2002.

Ricardo Salengue, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Pelotas no ano de 1987. Especializado em Master Business Administration em Gestão de Mercado de Energia em 2008 pela UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí. Desde de 1989 desenvolve atividades profissionais na ELETROSUL, onde atualmente é Gerente de Divisão Eletromecânica e Civil de linhas e subestações – ELETROSUL.

Flávio Eduardo Spressola, nascido em Jardinópolis/SP, em 1975. Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1999, MBA Executivo (2003) e Mestre em Sistemas Elétricos de Potência (2011) pela Universidade Federal de Itajubá. Trabalha na Alstom Grid, unidade Itajubá, desde 2000. Recebeu pela Alstom o título de Especialista Técnico em Transformadores para Instrumento e Ensaio Elétricos. Atualmente é Gerente Técnico do Produto Transformador de Potencial Capacitivo.

Rodrigo Oliveira Coelho da Silva, natural de Volta Redonda/RJ, é graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI em 2001. Iniciou sua carreira técnica em 2001 como Engenheiro de Projetos de transformadores de potência na Siemens. Na Alstom Grid desde 2002, atuou como Engenheiro de Cálculos e Projetos de TC e TP de média tensão até 2003. Neste ano transferiu-se para a unidade fabril da Alstom de Montrouge, em Paris, onde trabalhou de 2003 a 2006 como Engenheiro de P&D para transformadores AT. Desde 2009, dirige o departamento técnico de Engenharia e P&D da unidade Alstom de Itajubá atuando no projeto, desenvolvimento e aplicação de produtos AT (transformadores de média, disjuntores e seccionadores). Concluiu o MBA da Unifei em 2008 e participa do CRI - Centro de Referência em Inovação Minas da Fundação Dom Cabral.

Rodrigo Gomes de Oliveira, nascido em Santa Bárbara d'Oeste/SP em 1984. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 2007. Trabalha na Alstom Grid, unidade Itajubá, desde 2007. Recebeu o título de Especialista Técnico em Transformadores para Instrumento pela Alstom. Atualmente é Supervisor de Engenharia.

Willian Rink Casa Grande, nascido em São Paulo/SP, no ano de 1986.

Graduado em Engenharia Elétrica (2008) e Pós-Graduado em Sistemas de Energia Elétrica, Regulação, Suprimento e Mercado pela Faculdade de Engenharia Industrial – FEI, 2012.

Atualmente trabalha na Alstom Grid no setor de Automação de Subestações – Proteção e Controle.

José Fernando Peter Vaniel, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Luterana do Brasil, Canoas - RS, no ano de 1999. Desde de 1987 desenvolve atividades profissionais na ELETROSUL, nas áreas de Proteção, Controle e Medição onde atualmente é Gerente de Divisão de Engenharia de Proteção e Controle ELETROSUL.