



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

BR/GPC/16
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA
- GPC**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA NOVA METODOLOGIA PARA A PROTEÇÃO DE
TRANSFORMADORES DEFASADORES DIRETOS E SIMÉTRICOS**

Fábio H. S. Duz(*)
TSE

Rogério R. Silva
TSE

Ademir C. Guimarães
TSE

Roberto A. Ferreira
TSE

RESUMO

Este trabalho descreve a elaboração da proteção restrita do Transformador Defasador 345/138kV $\pm 30^\circ$ instalado na SE Padre Fialho – MG. São mostrados os problemas encontrados na aplicação dos esquemas convencionais de proteção, além das vantagens em utilizar relés digitais microprocessados que permitiram elaborar um esquema de proteção sem utilização dos sinais da posição dos comutadores OLTC, tornando a operação mais segura e confiável.

O estudo contou com um modelo elaborado em ATP, que possibilitou a verificação das alternativas inicialmente cogitadas, além de gerar arquivos COMTRADE para os testes realizados em bancada com caixas de teste sincronizadas por GPS.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador defasador direto simétrico, proteção de sistemas elétricos, relés numéricos, proteção de transformador defasador direto simétrico.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com as alterações nos modelos de mercado de energia elétrica no Brasil, cada vez mais se faz necessário o controle dos fluxos de potência das linhas de diferentes agentes do sistema elétrico. Além do que, com o crescimento do sistema interligado nacional SIN, novas conexões entre diferentes pontos do sistema estão sendo criadas, o que pode gerar a necessidade de controle dos fluxos de potência entre diferentes áreas do sistema. Neste contexto, a utilização de equipamentos que controlam o fluxo de potência em pontos estratégicos do sistema é de grande importância. Os transformadores defasadores, ao lado das FACTS são equipamentos capazes de cumprir esta tarefa.

O Transformador Defasador (TD) é um equipamento que insere um defasamento angular entre as tensões das barras às quais este está conectado com o intuito de aumentar ou diminuir o fluxo de potência através deste circuito, de acordo com a seguinte equação:

$$P = \frac{|U_S| \cdot |U_R|}{X_L} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

Onde, U_S representa a tensão na barra S, U_R a tensão na barra R, X_L a reatância do objeto que liga as barras R e S e δ o ângulo entre as tensões das barras R e S.

Existem vários tipos de transformadores para aplicações distintas, os quais podem ser classificados como segue:

(*) Rua São Judas Tadeu, n° 930 – sala 2 – CEP 37.500-172 Itajubá, MG, – Brasil
Tel: (+55 35) 3622-0796 – Fax: (+55 35) 3622-0685 – Email: fabio.duz@uol.com.br

- Diretos – Baseados em núcleos trifásicos. O defasamento angular é obtido pela conexão apropriada dos equipamentos;
- Indireto – São construídos em dois núcleos separados, um de excitação e um série;
- Simétricos – criam uma tensão de saída alterada apenas em ângulo em relação à tensão de entrada;
- Assimétricos – criam uma tensão de saída alterada em módulo e ângulo em relação à tensão de entrada;

A combinação destas características resulta em quatro categorias de TD, Direto Simétrico, Direto Assimétrico, Indireto Simétrico e Indireto Assimétrico.

O TD de Padre Fialho é capaz de controlar apenas o fluxo de potência ativa por ser do tipo direto e simétrico, construído em apenas um único núcleo trifásico. Seu esquema é mostrado na Figura 1.

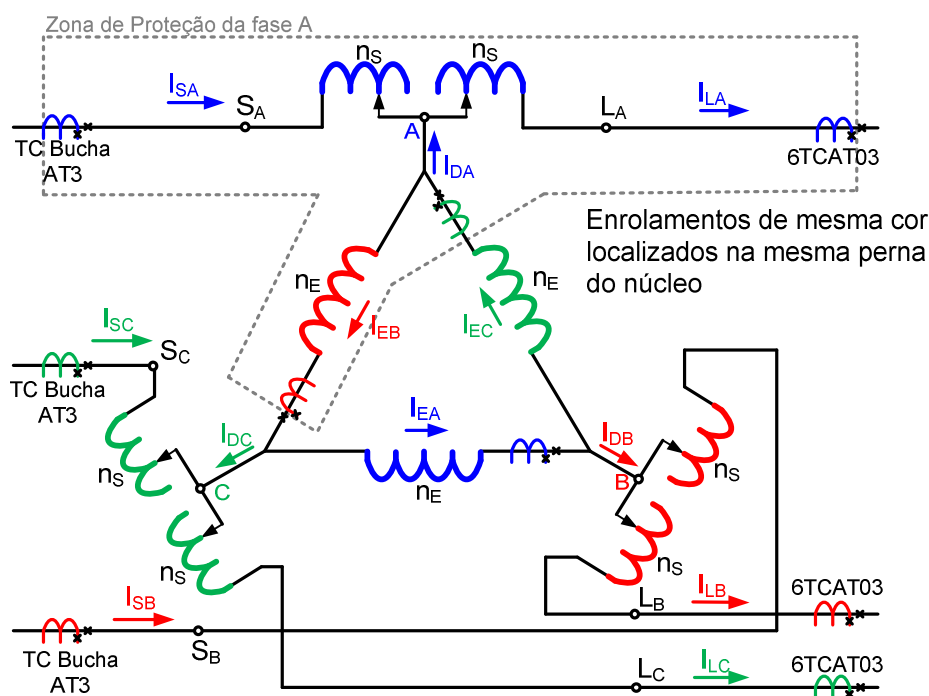


Figura 1 – Esquema do transformador defasador direto e simétrico.

2.0 - PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DEFASADORES

Devido às diferentes configurações existentes de TD, diferentes esquemas de proteção destas unidades são normalmente empregados. No entanto, as proteções normalmente utilizadas são similares às de transformadores convencionais. São elas: proteção diferencial, proteção de sobrecorrente, relé buchholz, relé de súbita pressão, sobretemperatura e POTT.

Neste trabalho, apenas a configuração direta e simétrica será estudada, uma vez que o transformador de Padre Fialho possui esta configuração.

2.1. Esquemas convencionais e seus problemas

2.1.1. Proteção diferencial convencional

De acordo com [3], para a condição balanceada, carga normal ou curto-circuito trifásico, a corrente diferencial vista pelo relé é dada pela equação:

$$I_d = I_{thru} \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

Onde, I_{thru} representa a corrente passante pelo TD e θ o ângulo de defasagem do TD. Desta forma a relação entre as correntes diferenciais e as correntes passantes, para os vários defasamentos angulares, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre as correntes diferenciais e correntes passantes para diversos ângulos de defasagem.

θ [°]	I_d/I_{thru}
0	0,00
10	0,17
20	0,35
30	0,52
40	0,68
50	0,85
60	1,00

Nota-se que para um ângulo de 30° a corrente diferencial representa mais de 50% da corrente passante, o que indica a necessidade de uma inclinação muito grande da característica diferencial percentual de relé, de forma que este não opere incorretamente para curtos-circuitos externos ou condições de carga. Isto faz com que o relé perca sensibilidade para faltas internas à zona protegida, podendo inclusive impedir a operação para determinados curtos-circuitos internos.

Para a condição de desbalanço, na qual coexistem as sequências positiva, negativa e zero, a relação apresentada acima não é verdadeira, uma vez que a sequência positiva defasa normalmente, a sequência negativa defasa em sentido oposto e a sequência zero não sofre defasagem [3][4]. Em [3] é mostrado que para uma falta externa fase-fase nas fases B-C do lado L (carga) do TD, surge corrente na fase A do lado S (fonte) do TD. Neste caso, a proteção diferencial da fase A identificaria corrente em apenas um dos lados do TD. Assim, caso a corrente diferencial da fase A atinja o ponto mínimo de operação, este pode vir a operar para uma falta externa. Isso mostra que apenas a alteração da inclinação da característica diferencial não seria suficiente para impedir a operação para este tipo de curto-circuito externo, o que prova que, para o caso de transformadores diretos, nos quais não se tem acesso a todos os terminais, a proteção diferencial convencional não produz resultados satisfatórios.

2.1.2. Proteção de distância POTT

A utilização do esquema POTT para proteção da região compreendida pelo transformador defasador do tipo direto simétrico não apresentou resultado satisfatório durante as simulações. Com esse esquema de proteção, houve sucesso apenas na simulação de defeitos simétricos equilibrados (curto circuito trifásico). Especificamente nesse caso foi possível identificar corretamente os defeitos dentro e fora da região protegida com atuações satisfatórias para defeitos em ambos os lados do equipamento.

O desafio iniciou-se na identificação do fator de correção homopolar (fator k_0) para defeitos do tipo desequilibrados para a terra. Por haver conexão elétrica diretamente com a excitação, há uma discrepante alteração do fator de correção homopolar para o caso do deslocamento dos tapes do transformador defasador.

Assim, pode-se constatar pelo modelo desenvolvido no ATP que as abstrações se confirmam e a parametrização do fator de correção homopolar para uma determinada posição dos tapes do transformador defasador causa atuação indevida para o lado em oposição ao fator adotado.

Nesse caso, defeitos internos ao transformador defasador podem não ser identificados ou como foram observados durante os testes, defeitos fase-terra externos à região protegida podem ser identificados como defeitos bifásicos (identificados por duas fases que compõem a excitação) provocados pela conexão elétrica através da excitação.

Os testes foram realizados para diversos casos pertinentes com a alteração do fator de compensação homopolar e as conclusões insatisfatórias desmotivaram a aplicação desse esquema na proteção do transformador defasador direto simétrico. A proteção a ser aplicada em equipamentos de grande importância para a operação por parte do ONS e manutenção da estabilidade do SIN deve funcionar com a mais perfeita segurança proporcionando

previsibilidade por parte dos operadores.

2.2. Método proposto por Z. Gajic

Os problemas inerentes à aplicação de esquemas tradicionais de proteção de transformadores aos TD são devidos ao fato destes possuírem defasamento angular variável durante sua operação.

Atualmente, os relés numéricos diferenciais são capazes de compensar a defasagem angular devida ao grupo de ligação do transformador, que é sempre múltipla de 30°. No entanto, os TD podem operar com ângulos de defasagem diferentes de 30°, positivos ou negativos, o que impossibilita a aplicação da compensação existente nestes relés.

Como solução aos problemas apresentados pelos esquemas convencionais de proteção, Z. Gajic [4] desenvolveu uma metodologia que trata genericamente a defasagem angular em TD, de forma online, através do status dos comutadores de tapes dos enrolamentos série dos TD. Tal metodologia se baseia no fato de as três componentes de sequência das correntes se defasarem de maneira diferente ao passarem pelo TD, como citado anteriormente. Deste modo, a compensação é feita em cada uma das componentes separadamente.

Para a determinação do ângulo a ser compensado é necessário descobrir qual a posição do TD, o que é feito por meio da aquisição do status dos tapes dos enrolamentos série do TD. Para cada posição dos tapes do TD, existe um defasamento angular correspondente. Desta forma, tendo estas informações inseridas no relé, para cada posição de tape o algoritmo utilizará a defasagem correspondente.

Nesta solução, após serem adquiridas e processadas pelo relé, as correntes são transformadas em componentes simétricas e, então, devidamente compensadas. Transformando novamente para grandezas de fase, após a compensação, estas correntes podem ser utilizadas na proteção diferencial convencional. Vale ressaltar que o algoritmo desenvolvido executa todo o processo de compensação e cálculo da corrente diferencial das fases de uma vez, na mesma equação matricial, como pode ser visto em [4].

Apesar de se mostrar muito útil na proteção de TD esta solução, segundo a ABB, não estava disponível comercialmente até a data da elaboração deste trabalho.

2.3. Compensação por meio de TCs internos

Em [4] é proposto um meio de compensação por meio dos TCs localizados dentro do delta do TD. O método se baseia no balanço da força magnetomotriz de cada uma das fases. Utilizando a notação da Figura 1 pode se escrever:

$$n_s \cdot I_{SA} + n_s \cdot I_{LA} + n_E \cdot I_{EA} = 0 \quad (3)$$

Dividindo esta equação por n_s tem-se:

$$I_{SA} + I_{LA} + \left(\frac{n_E}{n_s} \right) \cdot I_{EA} = 0 \quad (4)$$

Esta equação pode ser utilizada para calcular a corrente diferencial da fase A e, de maneira similar, para as fases B e C. Notar que n_E possui um número fixo de espiras e que n_s possui um número variável de espiras dependendo da posição dos comutadores de tape. Conhecendo-se a posição dos comutadores de tape pode-se fazer a compensação online para uma correta proteção diferencial, alterando os parâmetros e grupos de ajustes da proteção diferencial. Da mesma maneira que o método de Gajic é necessária a aquisição de sinais da posição dos comutadores de tape. Utilizando-se as correntes do delta de excitação não é necessária a compensação angular, apenas a magnitude da corrente de excitação é compensada.

É importante ressaltar que a confiabilidade da proteção diferencial fica atrelada à confiabilidade do sistema mecânico de comutação de tapes e de aquisição destes sinais. Esta aquisição pode ser feita por meio de entradas de sinal de corrente 4-20mA ou sinal de código binário BCD. Apesar de os códigos binários se mostrarem mais confiáveis que os sinais de 4-20mA, o ideal seria uma proteção diferencial independente de sistemas mecânicos que possam vir a falhar em operação normal.

2.4. Esquema de proteção proposto

O esquema de proteção diferencial proposto também utiliza os TC internos do delta de excitação do TD, no entanto, ao invés de fazer o balanço das forças magnetomotrizes dos enrolamentos, aplica-se a lei de Kirchhoff das correntes nos nós A, B e C da Figura 1. Considerando que as correntes que entram nos relés foram devidamente corrigidas com relação a polaridade dos TC, estas serão consideradas 'para o objeto', ou seja, todas as correntes entrando no nó A, por exemplo. Assim, tem-se:

$$\begin{aligned} I_{SA} + I_{LA} + I_{DA} &= 0 \\ I_{SB} + I_{LB} + I_{DB} &= 0 \quad (5) \\ I_{SC} + I_{LC} + I_{DC} &= 0 \end{aligned}$$

Substituindo $I_{DA} = I_{EC} - I_{EB}$, $I_{DB} = I_{EA} - I_{EC}$ e $I_{DC} = I_{EB} - I_{EA}$ em (5), vem:

$$\begin{aligned} I_{SA} + I_{LA} + I_{EC} - I_{EB} &= 0 \\ I_{SB} + I_{LB} + I_{EA} - I_{EC} &= 0 \quad (6) \\ I_{SC} + I_{LC} + I_{EB} - I_{EA} &= 0 \end{aligned}$$

De posse destas correntes é possível fazer a proteção da fase A, cuja zona de proteção é apresentada na Figura 1. Notar que na zona de proteção de fase A está inserida a fase B da excitação. Para as demais fases o raciocínio é similar. As correntes de cada TC do delta são utilizadas em duas equações com sinais opostos, no entanto, estes TC possuem apenas um enrolamento. Desta maneira, para que o relé seja capaz de operar de acordo com as equações (6), este deve ser capaz de:

- Operar com pelo menos quatro entradas de corrente para a mesma fase;
- Utilizar mais de uma vez o mesmo sinal de corrente;
- Possibilitar a inversão dos sinais de corrente para fins de adequação das polaridades.

O relé REG 670 da ABB, utilizado na proteção diferencial do TD de Padre Fialho, é capaz de cumprir estas exigências, pois:

- Este relé está configurado com um bloco de proteção diferencial para transformadores de três enrolamentos, sendo que para cada enrolamento é possível medir a corrente por meio de um ou dois TCs. O esquema de medição com dois TCs para um terminal é utilizado em casos de subestações com configuração disjuntor e meio. Portanto, existem até seis entradas de corrente para cada fase da proteção diferencial;
- Após os sinais de corrente serem lidos pelo relé eles podem ser utilizados em mais de uma função;
- Relé possui blocos denominados SMAI, que funcionam como multiplexadores, os quais são utilizados para a conversão dos sinais por fase (I_A , I_B e I_C) em apenas um sinal trifásico digital (I3P). Estes blocos possibilitam ainda, que o sinal seja invertido em 180°.

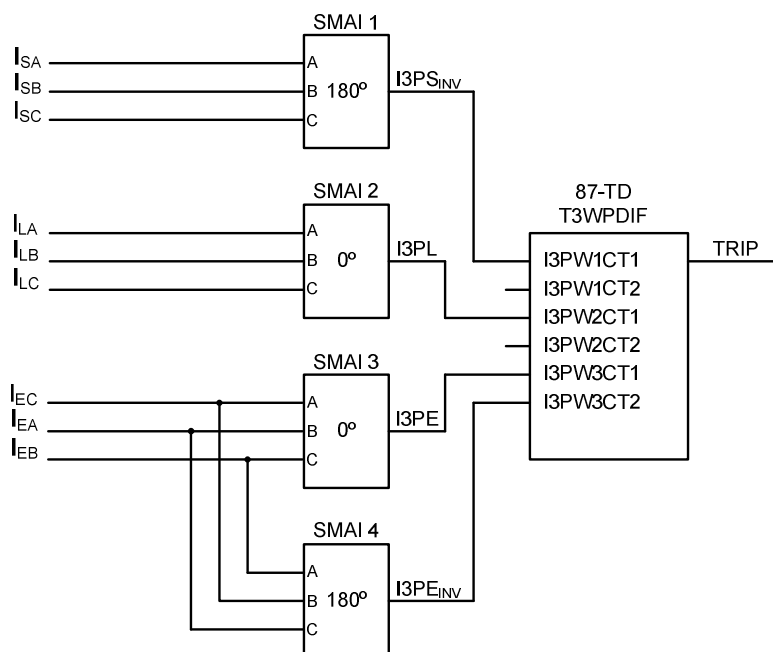


Figura 2 – Diagrama lógico da proteção diferencial do TD de Padre Fialho.

Notar que as correntes do SMAI 1, que representam as correntes do lado S do TD, estão sendo invertidas em 180° . Isto se deve ao fato de não estar sendo utilizado o TC de bucha do TD, mas sim o TC de bucha do terminal de 138kV do autotransformador AT03 345/138kV. Além disso, a fase A do SMAI 3 recebe a corrente I_{EC} e a fase A do SMAI 4 recebe a corrente I_{EB} , a qual é invertida. Este artifício é utilizado para satisfazer a equação de (6). Para as demais fases o raciocínio é o mesmo.

A função 87-TD foi parametrizada considerando a tensão dos três enrolamentos como sendo 138kV, conexão estrela, com ângulo de defasagem 0° . Não foi necessária a utilização de filtros de sequência zero, portanto estes foram desabilitados.

Deste modo, o esquema proposto foi implementado e os resultados obtidos estão apresentados no item 3.0.

3.0 - TESTES DE CAMPO DO ESQUEMA PROPOSTO

3.1. Modelo ATP do TD

Para a verificação da solução proposta foi necessária a implementação de um modelo no ATP. A maior dificuldade encontrada foi a obtenção de todos os dados necessários para a construção de um modelo trifásico do TD utilizando-se a rotina BCTRAN.

A rotina BCTRAN é utilizada no ATP para a simulação de transformadores com N números de enrolamentos. Como não se tem acesso a todos os terminais do TD, não é possível obter todos os dados necessários para a construção de um modelo trifásico deste no ATP. Assim, o TD foi modelado por meio de três unidades monofásicas de três enrolamentos representando os dois enrolamentos série e o enrolamento excitação. Os terminais das unidades monofásicas foram conectados devidamente de forma a compor o TD trifásico. Neste tipo de modelo, para cada posição do comutador de tapes deve ser construído um modelo com um correspondente número de espiras dos enrolamentos série e os dados utilizados são estimados a partir dos dados de ensaio. O modelo desenvolvido no ATPDraw está mostrado na Figura 3.

Após a construção do modelo, foram realizados os ensaios em vazio e de curto-circuito no modelo de forma a verificar e ajustar este para cada posição do comutador de tapes utilizada.

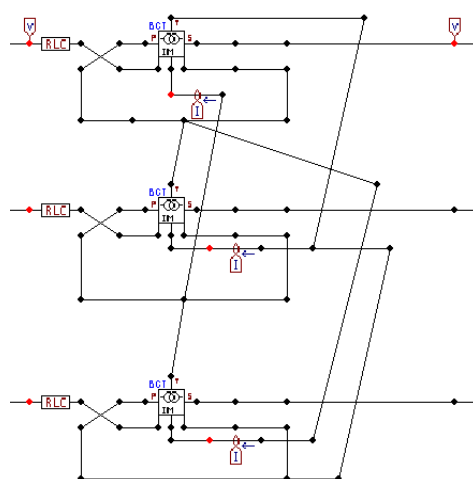


Figura 3 – Modelo do TD no ATP.

De fato, este modelo não é um modelo exato, uma vez que este assume a existência de três núcleos monofásicos ao invés de apenas um núcleo trifásico, como o TD de Padre Fialho. Para as seqüências positiva e negativa, esta diferença de representação não tem nenhum efeito, no entanto, para a seqüência zero a impedância é afetada.

Considerando-se que o relé não deve operar em hipótese alguma para uma falta externa, a proteção deve ser imune a operação para os mais diversos valores de curtos-circuitos fase-terra externos que possam ocorrer. Assim, uma pequena alteração na impedância de seqüência zero do TD não deve prejudicar a análise da proteção diferencial. Em curtos-circuitos fase-terra nos terminais internos ou nas primeiras espiras dos enrolamentos do TD, a corrente de curto é predominantemente determinada pela impedância de seqüência zero da fonte, o que diminui a importância de uma discrepância na impedância de seqüência zero do TD devida à representação.

Quando a proteção diferencial convencional é aplicada a transformadores com comutadores de tapes, a diferença de relação inserida pela comutação gera um erro que deve ser compensado no ajuste da proteção, além dos erros de TC. No caso da proteção proposta o erro é devido apenas aos TC, uma vez que considera a soma de correntes em um nó, ficando independente da posição de tapes. Desta forma, no modelo proposto o ajuste da proteção pode ser bastante sensível.

Considerando a falta de informações necessárias à implementação de um modelo trifásico e a importância diminuída de um pequeno erro na impedância de seqüência zero na análise da proteção, como descrito anteriormente, o modelo se mostra satisfatório para o estudo da proteção.

3.2. Testes dos relés em bancada

Para o teste da solução proposta foram simulados casos de curtos-circuitos trifásicos, fase-fase, fase-terra franco e com impedância de 50 Ohms, internos e externos de ambos os lados do TD, considerando as defasagens de -30°, -19°, 0°, 19° e 30°, totalizando 62 casos, de modo que os ajustes pudessem ser verificados integralmente.

As caixas de teste Omicron CMC-356, utilizadas no teste, possuem seis canais de corrente, de maneira que foram necessárias duas caixas para a realização do teste, uma vez que foram necessários nove canais de corrente – um para cada TC utilizado na proteção. Deste modo, para cada caso simulado foram gerados dois arquivos COMTRADE, um contendo informações das correntes do lado S e do delta e outro com informações do lado L.

Como foram utilizadas duas caixas simultaneamente, estas precisaram ser sincronizadas, o que pode ser feito de duas maneiras: por meio de entradas binárias ou por satélite. Inicialmente testou-se a utilização de entradas binárias, mas esta solução não foi satisfatória, pois, os disparos apresentaram uma diferença de tempo muito grande, chegando próximo a ¼ de ciclo. Assim os testes foram realizados com a sincronização por satélite.

Devido à escassez de tempo para a realização dos testes, foram selecionados 20 casos considerados mais relevantes. A Tabela 2 apresenta os resultados da atuação da proteção para estes 20 casos. Na Tabela 2 é possível verificar que a operação do relé ocorreu apenas para os curtos-circuitos internos.

Tabela 2 – Resultado das atuações da proteção diferencial nos testes.

Caso	Local de Defeito	Tipo de Falta	Posição angular	Atuação	Status
1	Externo Lado S	Fase-fase	0	Não Atuou	Ok
2	Externo Lado L	Fase-fase	0	Não Atuou	Ok
3	Interno Lado S	Fase-fase	0	Atuou	Ok
4	Externo Lado S	Fase-fase	+30	Não Atuou	Ok
5	Externo Lado S	Fase-fase	-30	Não Atuou	Ok
6	Interno Lado S	Fase-fase	+30	Atuou	Ok
7	Interno Lado S	Fase-fase	-30	Atuou	Ok
8	Interno Lado L	Fase-fase	-30	Atuou	Ok
9	Externo Lado S	Trifásica	+30	Não Atuou	Ok
10	Interno Lado S	Trifásica	+30	Atuou	Ok
11	Externo Lado S	Fase-terra	0	Não Atuou	Ok
12	Externo Lado L	Fase-terra	0	Não Atuou	Ok
13	Interno Lado S	Fase-terra	0	Atuou	Ok
14	Externo Lado S	Fase-terra	+30	Não Atuou	Ok
15	Externo Lado S	Fase-terra	-30	Não Atuou	Ok
16	Interno Lado S	Fase-terra	+30	Atuou	Ok
17	Interno Lado S	Fase-terra	-30	Atuou	Ok
18	Interno Lado L	Fase-terra	-30	Atuou	Ok
19	Interno Lado S	Fase-terra	+30	Atuou	Ok
20	Interno Lado L	Fase-terra	+30	Atuou	Ok

4.0 - CONCLUSÃO

A proteção diferencial de transformadores defasadores é complexa, podendo ser até inviável dependendo do tipo do TD, como o direto e simétrico de Padre Fialho. Apesar de existirem algumas propostas de solução à aplicação da proteção diferencial em TD, estas não estão disponíveis comercialmente.

A solução desenvolvida para a aplicação da proteção diferencial em transformadores defasadores diretos e simétricos, utilizando relés numéricos sofisticados, se mostrou simples e confiável, por não usar sinais dos comutadores de tape, sendo independente da defasagem angular do TD.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Jody Verboomen et al- 'Phase Shifting Transformers: Principles and Application';
- (2) Demetrios A. Tziouvaras et al 'PROTECTING A 138 KV PHASE SHIFTING TRANSFORMER: EMTP MODELING AND MODEL POWER SYSTEM TESTING' – SEL - Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- (3) IEEE – 'Protection of Phase Angle Regulating Transformers' - A report to the Substation Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee prepared by Working Group K1;
- (4) Z. Gajic – 'Differential protection solution for arbitrary phase shifting transformer'
- (5) Roger A.- Hedding ABB Inc. 'Some Old and New thoughts on Phase Angle Regulator Protection';

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fábio Henrique de Souza Duz

Nasceu em Capivari (SP), em 1980, graduado pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2009, tendo recebido o título de Engenheiro Eletricista. Atualmente trabalha na STATE GRID BRAZIL HOOLDING na área de Proteção, Controle e Comunicação.



Rogério Regis da Silva

Nasceu em Juruiaia (MG), em 1984. Graduado pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2009, tendo recebido o título de Engenheiro Eletricista. Mestre pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2013, em estudos de campos elétricos e magnéticos em subestações. Atualmente trabalha na TSE – Tecnologia em Sistemas Elétricos, na área de sistemas elétricos de potência.



Ademir Carnevalli Guimarães

Nasceu em Maria da Fé (MG) em 1946. Estudou no Colégio de Itajubá. Graduado pela EFEI em 1968, Msc. em Sistemas Elétricos de Potência, 1974, pela EFEI. Professor Titular da UNIFEI atuando nas áreas de subestações e proteção.



Roberto Alves Ferreira

Nasceu em Alterosa (MG), em 1961, graduado pela EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá) em 1987, tendo recebido o título de Engenheiro Eletricista. Atualmente trabalha na TSE – Tecnologia em Sistemas Elétricos Ltda, na área de Proteção e Estudos de Engenharia.