

Proteção de Distância Aplicada à Detecção e Eliminação de Falhas entre Espiras em Reator a Núcleo de Ar de Barras de 230kV

Carlos Felipe Ávila Klein (*)
ELETROBRAS ELETRONORTE

Marcos Vinícius Pimentel Teixeira
Instituto Militar de Engenharia - IME

Joaquim Neto de Rezende Júnior
ELETROBRAS ELETRONORTE

RESUMO

Neste trabalho será abordado a teoria envolvida no desenvolvimento da modelagem do reator *shunt* a núcleo de ar e os ajustes propostos para a proteção de distância de maneira a eliminar as faltas entre espiras envolvendo quantidades mínimas de espiras do banco de reatores. Também será analisada uma ocorrência relativa à falta entre espiras no banco de reatores *shunt* de barras seco a núcleo de ar de 100 Mvar-230kV da SE Jaurú e o respectivo desempenho do sistema de proteção, além de possíveis aplicações adicionais para as proteções estudadas.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de Distância; Reatores Shunt a núcleo de ar; SPCS; curto-circuito entre espiras; controle de tensão.

1- INTRODUÇÃO

Os reatores são equipamentos utilizados no sistema elétrico de potência com múltiplas finalidades, isto é: limitar as correntes de curto-circuito de sistemas elétricos; aterrar o neutro de um sistema elétrico de maneira a limitar as correntes entre fase e terra em condições de problemas de aterramento; reduzir o *ripple* da corrente DC em sistemas HVDC e amortecer harmônicos no lado AC, além de prover energia reativa para a comutação das válvulas em arranjos de filtros; compensar correntes capacitivas de linhas de transmissão com o reator conectado em *shunt*; reduzir níveis de curto-circuito em interligação de barramentos ou após enrolamentos de transformadores, dentre outras.

Para a aplicação de reatores no sistema elétrico com o objetivo de controle de tensão e compensação do efeito capacitivo das linhas de transmissão, a conexão dos enrolamentos do tipo estrela aterrada é a mais utilizada.

Estes equipamentos normalmente são construídos como: núcleo ferromagnético isolado a óleo, sem núcleo isolado a óleo ou seco a núcleo de ar.

Os reatores isolados a óleo com núcleo ferromagnético, possuem curva de saturação característica pronunciada, ou seja, o “joelho” atinge valores de tensão superiores à sua tensão nominal (variando de 1,25 a 1,35p.u.), segundo GAJIC; HILLTRÖM; MEKIC (2003). As características deste núcleo trazem também valores mais elevados de correntes de energização *inrush*, mais pronunciadamente quando o núcleo possui uma fenda, comumente denominada *gap*, em sua característica construtiva.

Estes reatores são constituídos de uma carcaça de metal, com núcleo magnético e enrolamentos internos isolados a óleo e possuem sistemas associados ao resfriamento interno dos enrolamentos. Também possuem proteções intrínsecas associadas à detecção de formação de gases internos e expansão do volume de óleo, com buchas isolantes para suas conexões ao sistema elétrico, o que os tornam grandes e pesados, conforme mostrado na Fig. 1.



Fig. 1 – Reator em derivação a núcleo ferromagnético isolado a óleo (Website Energoato RAESA).

Em contrapartida, os reatores a núcleo de ar conferem uma característica linear para a resposta à variação de tensão à qual estiverem submetidos. Como não possuem núcleo magnético, as correntes de magnetização em seus processos de energização são usualmente menores, de acordo com IEEE Std C37.109 (2006).

(*) Ed. Centro Corporativo Portinari – SEPN 504, Bloco “D”, - Asa Norte – CEP 70730-524 Brasília, DF, – Brasil Tel: (+55 61) 982003962 – E-mail: carlos.klein@eletrobras.com

Estes são feitos de enrolamentos concêntricos conectados em paralelo entre cruzetas de sustentação, com espaçadores para resfriamento e suspensos em estruturas de isoladores, conforme mostrado na Fig. 2.

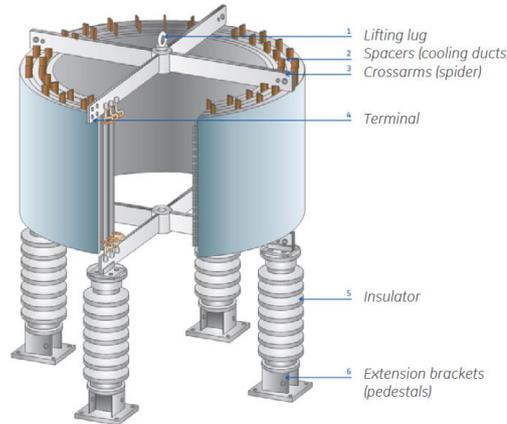


Fig. 2 – Reator a seco com núcleo de ar (GE Grid Solutions, 2018).

Além dessas diferenças, deve-se mencionar também as questões de custos de logística de transporte, de construção, operação e manutenção. Isto se traduz em economia para a solução através de reatores secos a núcleo de ar.

Na Subestação Jaurú 500/230kV, de propriedade das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.-ELETROBRAS ELETRONORTE, foi instalado um banco de reatores monofásicos de barras de 230kV a núcleo de ar em ligação estrela aterrado, de acordo com diagrama unifilar da Fig. 3 e conforme foto da Fig. 4.

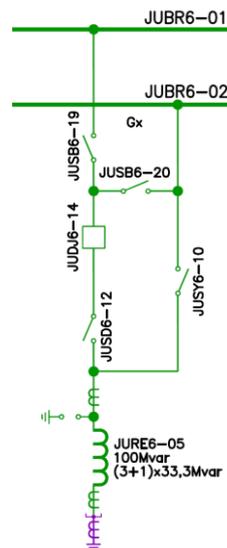


Fig. 3 – Diagrama unifilar do reator de barras de 230kV da SE Jaurú sob código operacional JURE6-05.

Este banco possui como características uma potência nominal de 3x37,82 Mvar na tensão de 245kV e impedância nominal de 529 Ohms por fase, com o objetivo principal de controle de tensão (compensação de potência reativa) no barramento de 230kV desta subestação. Seu fabricante é a empresa General Electric - GE e o modelo é XSSF-701 com reatância e corrente nominais por fase de 1403,33mH e 267,4 Ampères, respectivamente. Cada fase é composta de dois módulos instalados um sobre o outro e ligados em série.

Na tensão nominal de operação do barramento o equipamento apresenta potência de 3x33,33Mvar e corrente de 251 Ampères.



Fig. 4 – Banco de Reatores monofásicos de barras de 230kV a núcleo de ar da Subestação Jaurú 500/230kV (da esquerda para direita são mostradas as fases Azul, Branca, Vermelha e Reserva, respectivamente).

Com relação aos estudos de curtos-circuitos, sabe-se que as contribuições de reatores para faltas externas monofásicas limitam-se ao seu valor nominal de corrente. Para faltas internas ao equipamento, as contribuições variam conforme o tipo de falta e relativamente ao percentual de espiras envolvidas no ponto em que ocorre a falha.

De acordo com TRENCH GROUP (2016), faltas em reatores a núcleo de ar em derivação podem ser classificadas como: entre fases, fase-terra e entre espiras da mesma fase – comumente referidas como faltas do enrolamento longitudinal.

- Faltas entre fases:

Reatores *shunt* do tipo seco, por serem compostos de três enrolamentos monofásicos, incorrem em baixa probabilidade de uma falta de um enrolamento para outro. Os projetos são elaborados respeitando as distâncias de segurança para se evitar descargas elétricas com arcos-voltaicos entre colunas próximas. Para projetos com os enrolamentos das três fases empilhados em uma coluna, no entanto, podem ocorrer faltas entre as fases devido a um *flashover* nos isoladores entre bobinas de fases diferentes.

- Faltas fase-terra:

Uma falta do enrolamento principal para o aterramento pode ocorrer caso os isoladores da base da coluna sejam estressados eletricamente por tensão, continuamente ou temporariamente. Este tipo de falta ocorre quando o equipamento possui a característica construtiva de dois ou mais módulos de reatores conectados em série montados lado a lado, neste caso há o risco de um *flashover* de uma bobina intermediária para a terra.

- Faltas longitudinais:

Este tipo de defeito geralmente começa com descargas de superfície devido à poluição, deterioração do isolamento ou como falhas entre espiras de baixo nível; se não for detectado prontamente, todo o enrolamento pode ser danificado.

Projetos de enrolamento de reatores de derivação tipo seco utilizados atualmente possuem como característica construtiva o condutor do cabo constituído por fios trançados, todos estes conectados em paralelo. Assim, os curtos entre espiras provavelmente começarão por um rompimento do material dielétrico entre fios que compõem cabos individuais de espiras que estão próximas entre si. Há a possibilidade de ocorrer também entre espiras distantes umas das outras, caso uma descarga de superfície impulsionada por poluição forme uma ponte sobre uma seção de enrolamento, causando uma consequente perfuração da superfície do isolamento e do encapsulamento nas extremidades da descarga elétrica.

Então, uma corrente em *loop* será conduzida através dos fios pela tensão de volts ou a queda de tensão ao longo da seção do enrolamento. A descarga pode ser entre o mesmo fio do cabo ou, mais provavelmente, entre diferentes fios do cabo; em qualquer caso, a mudança na reatância, que pode ser substancial se toda a seção transversal do cabo participasse da descarga será muito pequena e quase nula devido à resistência do fio, que é um múltiplo da resistência total do cabo. Estas descargas elétricas iniciais são de baixa energia e a alteração resultante destas na impedância total dos enrolamentos é pequena, não ocasionando alterações perceptíveis nas tensões e correntes monitoradas pelo sistema de proteção. No entanto, se o arco-voltaico for mantido, essas pré-descargas acabarão por resultar em um forte arco-voltaico ao longo de todo o enrolamento. Como resposta, os relés de proteção atuarão no desligamento do disjuntor do reator em 50 a 100 ms, porém neste processo danos irreparáveis poderão ter ocorrido ao equipamento.

Para se exemplificar a dificuldade na detecção deste tipo de falta, será evidenciado abaixo um estudo de curtos-circuitos entre espiras de um banco de reatores monofásicos *shunt* solidamente aterrado em sistema de alta tensão, neste caso, em tensão sistêmica de 220kV. Este estudo foi extraído da referência TRENCH GROUP (2016).

O equipamento possui potência nominal de 60Mvar, corrente nominal de 158 Ampères e impedância nominal de 800 Ohms por fase, respectivamente e sendo constituído por enrolamentos com aproximadamente 1550 espiras cada.

Na tabela 1 apresenta-se as menores variações de impedâncias e correntes de neutro e de sequência negativa, resultantes de faltas envolvendo quantidades mínimas de espiras.

Tabela 1 – Informações típicas para faltas entre espiras em reator shunt seco a núcleo de ar para sistemas de alta tensão (TRENCH GROUP, 2016).

Espiras em curto	$\Delta X_{fase}(\%)$	$\Delta I_N(\%)$	$\Delta I_2(\%)$
1-2	-1,1	1,1	0,4
1-3	-2,5	2,5	0,8
1-5	-3,4	3,5	1,2
1-10	-4,0	4,2	1,4

A mudança na reatância da fase defeituosa devido a um curto-circuito entre quantidades pequenas de espiras não causa substanciais mudanças nos parâmetros das tensões e correntes dos reatores *shunt* para *pick-up* do relé. Estas mudanças nos parâmetros são tão pequenas que se assemelham às variações decorrentes de desequilíbrio natural do sistema ou assimetria entre as fases do reator.

Detalhamento de Faltas entre Espiras

A exposição a ambientes externos agressivos (poluição, calor e umidade), pode causar a penetração de água e poluentes na superfície interna das bobinas dos reatores a seco. Isto é a principal causa dos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão que ocasionam a falta mais comum neste tipo de equipamento, que é o curto-circuito entre espiras. Este é responsável por mais de 50% do total de faltas ocorridas conforme ZHANG, et al. (2017).

Na fig. 5 (a) evidencia-se o sentido normal da corrente circulante na bobina do reator. Porém, quando ocorre um defeito no isolamento entre duas espiras, estas se aproximam para formar um anel de curto-circuito pela força de atração eletromagnética, sendo prontamente separadas após sua colisão pela força repulsiva eletromagnética. Isto ocorre porque a direção da corrente de curto-circuito é oposta à da corrente circulando nas espiras normalmente de acordo com a lei de indução eletromagnética. Como mostrado na fig. 5 (b), a *m*ésima volta se transforma em um anel de curto-circuito. Isso pode ser chamado de período de falta precoce, no qual as espiras adjacentes repetem as colisões e afastamentos.

A grande corrente induzida do anel de curto-circuito pode causar alta temperatura local e agravar o dano de isolamento, que leva à soldagem das espiras adjacentes. Este é o chamado de período de falta, durante o qual as espiras tocadas não serão mais separadas e um anel de curto-circuito constante será formado o que pode causar um curto-circuito mais severo, até mesmo queimar o reator, de acordo com ZHANG, et al. (2017).

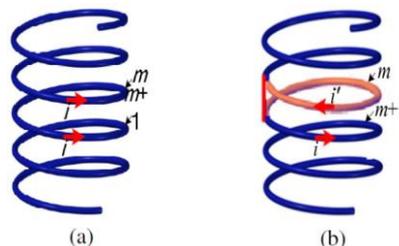


Fig. 5 – (a) Corrente circulante no reator em condições normais; (b) Corrente circulante em espiras em curto-circuito (ZHANG, et al., 2017).

A localização do curto entre espiras é mais provável nos enrolamentos mais próximos à parte de alta tensão do reator de derivação. Como exemplo, tem-se as faltas causadas por uma tensão de impulso de descarga eletrostática como tempestades com raios.

Uma possível forma de proteger o reator deste tipo de falta é projetar este equipamento com mais isolamento na parte superior e equipar o sistema com um para-raios, para limitar as altas correntes.

Com o intuito de proteger os reatores *shunt* a núcleo de ar, a filosofia dos sistemas de proteção normalmente recomenda:

- Funções de sobrecorrente de neutro temporizada e instantânea (50/51N) e sobrecorrente instantânea e temporizada de terra 50/51G.

Durante um defeito entre espiras em um reator aterrado, haverá correntes de sequência zero presentes. A proteção de sobrecorrente de falta à terra, portanto, também oferece algum grau de proteção para este tipo de defeito. As ligações efetuadas para as proteções 50/51N estão evidenciadas na fig. 6(b). Na fig. 6(a) é possível identificar a ligação da proteção ao circuito secundário de um transformador de corrente no ponto de aterramento do reator.

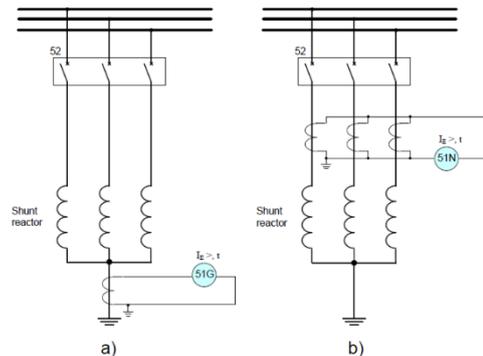


Fig. 6 – a) Ligação da proteção 51G no transformador de corrente instalado no ponto de aterramento do reator; b) Ligação da proteção 51N pelo somatório dos transformadores de corrente das fases do reator (CIGRE B5.37, 2013).

- Funções de distância de fase e neutro 21/21N

A função de distância normalmente consiste em uma única zona com relé de subimpedância “enxergando” para dentro do reator do lado do terminal, conforme mostrado na Fig. 7. O relé de distância pode fornecer proteção instantânea para fase, fase-terra, assim como também para faltas entre espiras, até certo ponto. Semelhante à proteção de sobrecorrente, a proteção de distância geralmente não detecta curtos-circuitos perto do ponto de aterramento em virtude das baixas tensões induzidas, as quais não permitem detecção pelos algoritmos dos relés de proteção.

O curto-circuito entre espiras do enrolamento da mesma fase resulta em diminuição da impedância aparente da fase e a proteção de distância é capaz de detectar esta condição. No entanto, a sensibilidade pode não ser suficiente para detectar faltas entre espiras ao longo de todo o enrolamento. Para se manter a estabilidade da proteção frente a energizações e ao consequente *inrush*, recomenda-se ajustar o alcance de uma primeira zona de aproximadamente 60% da impedância nominal do reator. Assim, este ajuste não será efetivo para detecção e eliminação de faltas envolvendo poucas espiras.

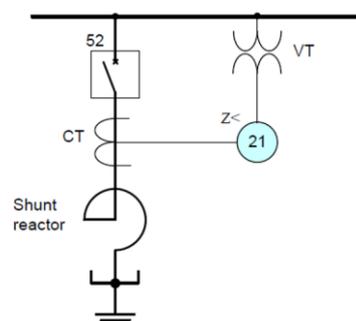


Fig. 7 – Esquema de ligação da proteção de distância voltada para a impedância do reator (CIGRE B5.37, 2013).

Caso seja possível utilizar uma segunda zona temporizada associada ao esquema de proteção de subimpedância, a sensibilidade da proteção para curtos-circuitos entre espiras será aumentada. No entanto, este elemento de proteção de distância deve ser atrasado ou bloqueado durante energizações do equipamento, pois as correntes e tensões medidas pelo relé decorrentes deste fenômeno podem ocasionar atuação incorreta desta proteção.

Por exemplo, a impedância aparente para uma falta entre espiras de 5% é de aproximadamente $0,95^2 \times X_L$, isto negligenciando-se a impedância de magnetização e a resistência devido às perdas do reator. Da mesma forma, um curto-circuito entre espiras de 20% dentro do reator produzirá uma impedância aparente de $0,64 \times X_L$, conforme evidenciado na Fig. 8.

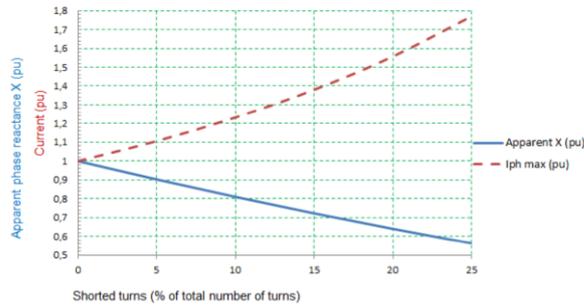


Fig. 8 – Reatância aparente para faltas entre espiras relativas à variação do ponto de falta internamente no reator (CIGRE B5.37, 2013).

Para comparação, a quantidade de corrente de falta à terra 3I0 e corrente de sequência negativa durante as faltas entre espiras são mostradas na Fig. 9. O fato de que a corrente 3I0 aumenta rapidamente relativamente à quantidade das espiras envolvidas no curto-circuito é utilizado em alguns esquemas especiais de proteção.

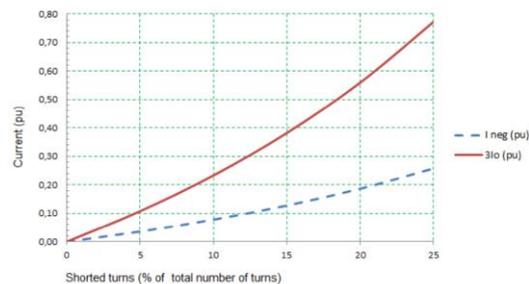


Fig. 9 – Valores de corrente de curto-circuito de sequência zero e negativa relativas à percentual de espiras envolvidas na falta (CIGRE B5.37, 2013).

- Proteção de sobrecorrente de falta à terra controlada por relé direcional de sequência zero

O uso de proteção direcional de falta à terra controlada por um relé direcional é aplicado como proteção contra falta por alguns fabricantes de relés. O esquema usa um relé direcional de sequência zero para controlar uma proteção de sobrecorrente de falta à terra no neutro. A seta azul na Fig. 10 indica a direção de operação direta. Com a direção indicada, o esquema pode não operar para faltas fase-terra, pois a corrente no secundário do transformador de corrente estará contrária à direção de operação do relé. Isso não é preocupante, pois este esquema é fornecido exclusivamente para detecção de falhas entre espiras.

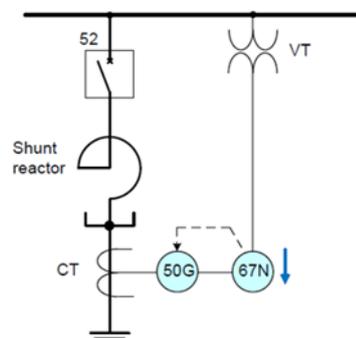


Fig. 10 – Sobrecorrente residual com elemento supervisor de direcionalidade para detecção de faltas internas ao reator (CIGRE B5.37, 2013).

Devido às baixas tensões de sequência zero resultantes de defeitos do reator entre espiras, a função de sobrecorrente direcional de neutro (67N) pode ter dificuldade em prover cobertura adequada. Este problema pode ser superado usando um relé direcional que tem a tensão de polarização reforçada pelo uso da corrente de sequência zero passando por uma impedância. O valor de impedância usado deve ser menor do que a impedância do reator *shunt*, de modo a evitar operação direcional incorreta para faltas desequilibradas externas ao reator. Além disso, um pequeno atraso na função 67N, consistindo em algumas centenas de milissegundos, aumenta a segurança do esquema.

Este tipo de implementação é bastante utilizado pelo fabricante Schweitzer Engineering Laboratories, pois seu relé de sobrecorrente pode ser associado a algoritmos de direcionalidade por impedância de sequência zero e sequência negativa, conforme LIMA (2023).

2- MODELOS DE REATORES USADOS E PROPOSIÇÃO DE ADEQUAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DOS REATORES

Com o objetivo de simular as correntes de curto-circuito foi solicitado ao fabricante do banco de reatores um estudo considerando a modelagem detalhada para casos de faltas entre espiras.

Esta modelagem detalhada é necessária porque as distribuições de reatâncias e capacitâncias entre as espiras se modificam a cada configuração de curto-circuito, devido à quantidade de espiras envolvidas e ao percentual do enrolamento do reator em que está localizada a falta. Em outras palavras, as indutâncias e capacitâncias resultantes são modificadas para cada cenário de curto-circuito.

O modelo usado pelo fabricante envolve a representação das fases do reator a núcleo de ar conforme Fig. 11. Isto é, para se efetuar simulações de faltas entre espiras, este modelo foi dividido em “n” seções distintas. Após esta divisão, o enrolamento possuirá três partes principais: primeira seção íntegra, segunda seção em curto-circuito e terceira seção novamente íntegra.

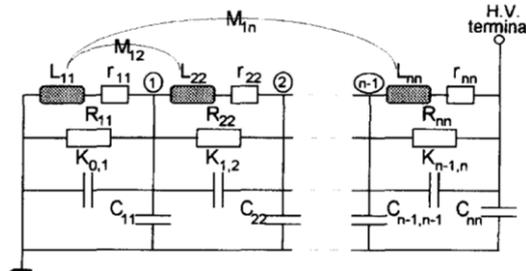


Fig. 11 – Modelo do enrolamento de cada fase do reator para faltas entre espiras (PRIKLER, et al. 1997).

Os valores das indutâncias próprias e mútuas foram obtidos conforme as equações (1) a (3).

$$L_a + L_b + L_c + 2 \times (M_{ab} + M_{bc} + M_{ca}) = L_{total} \quad (1)$$

$$\sigma_{jk} = 1 - \frac{M_{jk}^2}{L_j \times L_k} \quad (2)$$

$$\frac{L_j}{L_k} = 1 - \left(\frac{n_j}{n_k}\right)^2 \quad (3)$$

Onde:

j e k podem assumir os valores a, b ou c;

L_j é a indutância própria da seção j e L_k é a indutância própria da seção k;

M_{jk} é a indutância mútua entre as seções j e k; e

σ_{jk} é o fator de dispersão.

Além do modelo do fabricante, desenvolveu-se outras modelagens de curtos-circuitos entre espiras, de maneira a comparar com a modelagem repassada pelo fabricante. No modelo proposto tem-se como diferença a consideração da resistência do reator. Na tabela 2 apresenta-se os resultados obtidos pelo modelo do fabricante (GE) e pela simulação no ATP usando o modelo proposto. De posse desta modelagem e utilizando o equivalente de Thevenin no barramento de 230kV da Subestação Jaurú, foram verificados os valores de corrente para faltas internas entre espiras mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Informações de curto-circuito entre espiras fornecidas pela GE em comparação com resultados das simulações no programa ATP.

Espiras em curto-circuito			Modelo Fabricante (dados da GE)		Modelo Proposto (dados simulados no ATP*)	
No.	Espiras	% da fase	I2(%)	In(%)	I2(%)	In(%)

2	1-2	0,14	2,68	8,01	2,755	7,66
4	1-4	0,27	3,07	9,21	3,156	8,86
8	1-8	0,55	3,6	10,8	3,679	10,43
14	1-14	0,96	4,16	12,48	4,249	12,14
30	1-30	2,05	5,22	15,66	5,295	15,28
32	1-32	2,19	5,34	16,02	5,426	15,67
36	1-36	2,46	5,56	16,68	5,64	16,32
40	1-40	2,74	5,75	17,25	5,787	16,76
130	1-130	8,89	9,7	29,1	9,11	27,33
146	1-146	9,98	10,43	31,29	9,813	29,44
162	1-162	11,08	11,18	33,54	10,523	31,57
230	1-230	15,73	14,72	44,13	14,811	43,83
232	1-232	15,87	14,82	44,43	14,917	44,14
236	1-236	16,14	15,05	45,12	15,109	44,72
240	1-240	16,41	15,25	45,69	15,33	45,38

*Os resultados do ATP consideram a resistência do reator.

Na tabela 2, a coluna Espiras é referente à sequência de espiras envolvidas na falta, I2 é a corrente de sequência negativa e In é a corrente de neutro.

Estes resultados se apresentaram bastante próximos, com pequenas diferenças devido à representação da resistência do reator.

Após a validação do modelo do reator, este foi implementado em caso ATP considerando a rede elétrica da Subestação Jaurú até a vizinhança 3. Com o caso montado, foram efetuadas simulações de faltas internas e externas, além de simulações de energização de transformadores, reatores e linhas de transmissão nas proximidades. Para todos os casos foram medidas as correntes no início e no final dos enrolamentos do banco de reatores monofásicos, além das tensões medidas no barramento de 230kV.

Com base nestes resultados, foram plotadas as correntes e tensões de falta no módulo PL4 em ambiente EMT-ATP. De posse destes sinais, foram exportados em formato *comtrade* para aplicação no relé de proteção específico para o fornecimento do banco de reatores monofásicos de barras de 230kV da SE Jaurú (JURE6-05).

Os testes foram efetuados utilizando os arquivos *comtrade* gerados acima para aplicações de tensões e injeções de correntes trifásicas no relé do fabricante NR ELECTRIC modelo PCS978S com caixa de testes hexafásica da Omicron CMC-356.

Após a aplicação de falta no relé extraiu-se o registro oscilográfico de cada caso. O desempenho do sistema de proteção frente às faltas resultou em adequações para os ajustes das funções de proteções inseridas no relé.

A princípio o entendimento era de que a proteção 21IT seria suficiente para atuar de maneira satisfatória em todos os casos, porém esta proteção se mostrou suficiente para simulações de faltas envolvendo um percentual maior ou igual a 15,73% das espiras do enrolamento. Desta maneira, a proteção de distância disponibilizada nas configurações do IED foi utilizada para complementar a função 21IT, esta denominada 21T pelos ajustes do relé.

As relações de transformações utilizadas foram:

Transformadores de corrente de pedestal das fases (topo e base dos enrolamentos):

$$RTC_1 = 1000/5 \quad RTC_2 = 1000/5$$

Transformador de corrente de pedestal no fechamento de neutro do reator:

$$RTC_3 = 400/5$$

Transformador de potencial tipo capacitivo (TCP) no lado de 230kV do equipamento:

$$RTP = \frac{230000/\sqrt{3}}{115/\sqrt{3}}$$

Para as funções de proteção 21IT e 21T1/T2, considerou-se a seguinte relação de transformação de impedância primária para secundária:

$$K_z = \frac{RTP}{RTC_1} = 10$$

Ou seja, o valor de impedância nominal secundária por fase do reator com a correção pelo fator K_z é de 52,9 Ohms.

A função 21IT funciona com algoritmo interno ao relé, sem necessidade de ajustes, há apenas o menu de habilitação da função no relé dentro do menu *Protection Settings*, submenu *IntTurn_Settings*.

Para a proteção de distância 21T, foram utilizadas duas zonas de proteção de característica *mho* e com ângulo de 89 graus. Em teoria, para se proteger o reator o ângulo correto seria 90 graus, porém a excursão máxima deste ajuste é 89 graus, o que não compromete o alcance definido para os estágios da proteção.

Ambas as zonas de proteção com temporização de 20 ms para loop fase-neutro e 40 ms para loop fase-fase. O diâmetro da característica da primeira zona *mho*, denominada 21T1, foi de 37,03 Ohms secundários, referente a 70% da impedância nominal secundária do reator. Para a segunda zona, denominada 21T2, o diâmetro foi de 50.26 Ohms secundários, relativo a 95% da impedância nominal do reator. Nos testes efetuados, observou-se que a partir de 96% neste ajuste ocorreram operações indevidas no processo de energização do reator, por isso manteve-se o percentual máximo de 95%.

Além disso, ainda para se evitar operações indevidas em energizações do equipamento, utilizou-se uma lógica de recebimento do comando de fechamento do disjuntor para bloquear a função 21T2 por 500 ms, conforme Fig. 12.

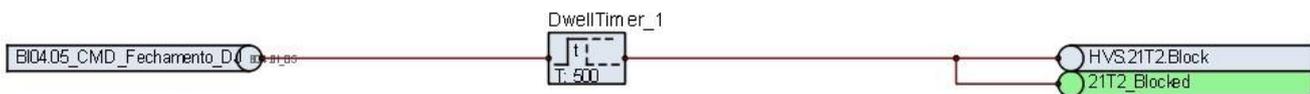


Fig. 12 – Lógica de bloqueio da função 21T2 por comando manual de fechamento do disjuntor do reator.

Para os testes efetuados, foram obtidos os resultados resumidos na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Síntese dos resultados dos testes comparativos entre as proteções 21IT, 21T1 e 21T2.

Condição Simulada	Atuação de Funções Unitárias	Comentários
Falta Fase/ramal no reator	Nenhuma	Conforme esperado
Energização de objetos adjacentes	Nenhuma	Conforme esperado
Menor falta interna	21T2 (Atuação em 29ms)	Cobertura mínima de 0,27% do enrolamento (4 espiras). Não foi possível sensibilizar para faltas menores que 4 espiras. Não houve atuação das demais funções de impedância e nem das funções diferenciais.
Maior falta interna	21T1 (Atuação em 24,7ms) 21T2 (Atuação em 13,7ms) 21IT (Atuação em 52,2ms)	Cobertura mínima de 15,73% do enrolamento (230 espiras). Não foram simuladas faltas com percentual de espiras maior que 16,41% devido à estratégia de modelamento. Não houve atuação das funções diferenciais.

Desta maneira, ficou evidenciada a necessidade da utilização da proteção de distância associada ao esquema pré-definido da proteção. Isto porque a sensibilidade para os menores valores de falta possíveis chegou a 0,27% do reator, ou seja, para uma falta entre duas espiras consecutivas separadas do ponto de fechamento de neutro da estrela por apenas quatro espiras.

3- ESTUDO DE CASO

Será apresentada a análise da perturbação ocorrida na data de 17/02/2022, consistindo em falta interna ao banco de reatores seco a núcleo de ar de código operacional JURE6-05, caracterizada por curto-circuito entre espiras na fase Vermelha do equipamento.

Neste evento ocorreu uma falta entre espiras no módulo inferior (cilindro) do enrolamento do reator relativo à fase Vermelha. A primeira proteção a atuar foi a função de distância em segunda zona 21T2, ocorrida nas cadeias principal e alternada de proteção, após 65 ms do início da perturbação. Ao se comprovar a falta interna ao equipamento, solicitou-se que a equipe de eletromecânica efetuasse ensaios no reator, nos quais detectou-se variação elevada de impedância para a fase que apresentou a falta.

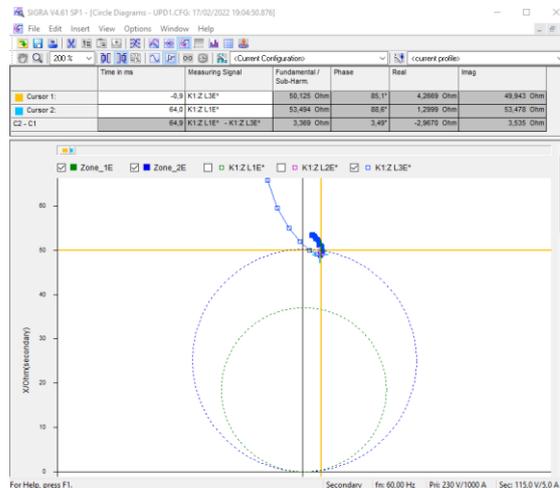


Fig. 13 – Diagrama de impedância da perturbação observado a partir do arquivo de oscilografia gerado pelo relé na perturbação.

Por consequência dos ensaios elétricos foi substituído o reator desta fase pelo da fase reserva. Adicionalmente, o cilindro do enrolamento em falta foi encaminhado ao fabricante para avaliação. Este efetuou corte nas seções concêntricas do equipamento até se constatar uma seção com evidências de falta entre espiras, a qual, segundo o fabricante, foi ocasionada por falha no processo produtivo do equipamento.

Na ocorrência em questão observou-se a adequada atuação da proteção de distância na zona *mho* 21T2. A impedância entre a fase Vermelha e neutro medida pelo relé permaneceu por 65 ms dentro da região desta zona até a eliminação da falta pela abertura do disjuntor do reator. Este desempenho está detalhado na Fig. 13. Provavelmente as funções 21IT, 21T1 e diferencial seriam logo em seguida sensibilizadas, porém como o tempo de resposta foi bastante baixo e a sensibilidade da função 21T2 é bem maior, não se observou as atuações destas outras proteções.

4- CONCLUSÕES

As faltas entre espiras, como foi possível observar, são as mais comuns em reatores de derivação, porém ao mesmo tempo são as mais desafiadoras de detectar e eliminar com o mínimo de danos ao equipamento. Em reatores *shunt* imersos em óleo, as proteções 63 Buchholz e válvula alívio de pressão representam alta confiabilidade para este tipo de falta, sendo consideradas por muitos fabricantes como as proteções principais deste tipo de equipamento.

Entende-se que a proteção de distância entre espiras (21IT), desenvolvida pela fabricante NR ELECTRIC, não obteve desempenho adequado para a totalidade das faltas entre espiras no reator a núcleo de ar. Porém, a associação desta proteção à função de distância convencional disponibilizada pela fabricante no relé trouxe uma confiabilidade maior e tempo de eliminação de falta menor ao sistema de proteção do equipamento.

De maneira a aperfeiçoar a função desenvolvida pelo fabricante, a ELETRONORTE efetuou pedido de desenvolvimento de *firmware* com melhorias de desempenho da função 21IT, através de maior sensibilidade das tensões utilizadas nos cálculos desta proteção.

O fabricante do relé retornou que não seria possível introduzir alterações no algoritmo para chegar à sensibilidade solicitada, pois a suscetibilidade de operação da função 21IT somente poderia atingir condições mínimas de tensão de sequência zero para o mínimo de $3 \cdot V_0 > 0,02p.u.$ (considerando a ausência de harmônicos). O que se traduz em valor secundário de tensão para o relé de aproximadamente 2,3 V.

Em consulta especial ao setor de pesquisa e desenvolvimento da NR ELECTRIC, foi repassada a informação de que o algoritmo não deve sensibilizar para faltas com contribuições de tensões secundárias de valores tão baixos, de maneira a evitar operação indevida. Ressalta-se que esses valores são muito pequenos, muito próximos a possíveis oscilações de medição de tensão do reator em operação normal. É realmente um grande desafio para os engenheiros de proteção definir ajustes com adequada segurança para este tipo de equipamento. Dessa forma, o posicionamento formal da NR ELECTRIC foi de que não se deve diminuir a sensibilidade de tensão do algoritmo.

A literatura de sistema de proteção de reator à núcleo de ar, nacional e internacional, nos mostra que esse objeto não teve seus limites de proteção na ordem de poucas espiras atingidos através de uma única função de proteção. O que se tem visto

em aplicação de projetos ao redor do mundo são “esquemas de proteção”, onde mais de uma função é combinada para cobrir o máximo de sensibilidade do enrolamento para faltas entre espiras.

No caso da solução de SPCS da NARI BRASIL para o reator à núcleo de ar da ELETRONORTE na SE JAURU, o sistema de proteção do reator composto por um esquema de proteções de impedância, combinando função de impedância convencional (baseada em componentes de fase – 21T) e função *inter-turn* (baseada em componentes simétricas de sequência zero – 21IT) se mostrou bastante adequada.

Esta filosofia de proteção tem sua aplicação possível também em reatores a óleo, de maneira a complementar a atuação das funções desempenhadas pelos relés 63 Buchholz e válvula de segurança.

Uma possibilidade de pesquisa é a avaliação se a função disponibilizada pela NR ELECTRIC ou a própria função de distância convencional incorporada na proteção destes reatores poderia minimizar danos causados aos seus enrolamentos em casos de faltas entre espiras pela possibilidade de detectar e eliminar faltas em tempo menor que as funções intrínsecas tradicionais do equipamento isolado a óleo.

Outra possibilidade é avaliar a implementação de proteções de distância em reatores presentes em filtros de harmônicos ou até mesmo em reatores controlados por chaveamento de válvulas tiristoras, normalmente conhecidos como *Thyristor Controlled Reactor* - TCR, pois as proteções de dessintonia, muito utilizadas nessas implementações, não minimizam sinistros ou danos observados em perturbações nestes equipamentos.

5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIGRE, Working Group B5.37, “Protection, Monitoring and Control of Shunt Reactors”, agosto 2013.

GE Grid Solutions – “Managing Transmission Voltages in Power Systems with Air Core Shunt Reactors”, 2018.

GAJIC, Z.; HILLSTRÖM, B.; MEKIC, F.; “HV Shunt Reactor Secrets for Protection Engineers”, 30th Western Protective Relaying Conference, outubro 2003.

IEEE Std C37.109-2006, “GUIDE FOR THE PROTECTION OF SHUNT REACTORS”, dezembro 2006.

LIMA, P, “Um Novo Olhar sobre Proteção de Reatores Shunt na Prática”, XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, novembro 2023.

NR ELECTRIC CO. “PCS-978S Transformer Relay Technical Manual”, Edição 1, dezembro 2020.

PRIKLER, L., G. Ban, G. Banfai. “EMTP Models for Simulation of Shunt Reactor Switching Transients.” International Journal of Electrical Power & Energy Systems 19.4 (1997): 235-240.

TRENCH GROUP, “Dry-type, Air-core Shunt Reactors Relay Protection”, abril 2016.

ZHANG, B, et al., “Simulation on Transient Characteristics of Inter-Turn Short Circuit Fault of Dry-type Air-Core Reactor Based on ANSYS Maxwell”, 2017 Internacional Conference on Electrical Engineering and Automation Control (ICEEAC 2017).

DADOS BIOGRÁFICOS



Carlos Felipe Ávila Klein é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília em 2006, pós-graduando em Sistemas de Proteção de Energia Elétrica pelo IME em 2023/2024.

Engenheiro de Proteção com mais de 17 anos de experiência em Análise de Curto-circuito, Estudos de Graduação de Proteção de Sistemas de Transmissão, Análise de Perturbações do Sistema Elétrico Brasileiro e Comissionamento de Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão.

Atualmente exercendo o cargo de gerente do Departamento de Estudos de Graduação de Proteção da ELETRONORTE.



Marcos Vinícius Pimentel Teixeira é Doutor e mestre em engenharia elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, engenheiro eletricitista graduado pela Universidade Federal Fluminense - UFF e técnico em eletrônica formado pela Escola Técnica Estadual João Luiz do Nascimento. Atualmente é professor de magistério superior do departamento de engenharia elétrica do Instituto Militar de Engenharia - IME onde leciona na graduação e na pós-graduação. Possui experiência como engenheiro de sistemas elétricos de potência e realiza pesquisa nas áreas de estudos

em regime permanente, estabilidade eletromecânica, estabilidade de tensão, proteção de sistemas elétricos, serviços auxiliares à operação elétrica e desenvolvimento de técnicas/ferramentas para apoio à decisão da operação em tempo real.



Joaquim Rezende Jr. possui mestrado em Engenharia Elétrica Pela Universidade de Brasília (1999). Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1988). Desde 1989 faz parte do quadro da Eletrobras Eletronorte como Engenheiro Eletricista. Atualmente faz parte da Gerência de Estudos de Graduação da Proteção – OOPE.N e tem experiência nas áreas de Estudos Elétricos e Estudos de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.