

Metodologia de Testes para Avaliação da Proteção Diferencial Numérica de Transformadores diante de Transitórios

Jesus, V. M. R.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itabira (MG), Brasil
victor.rodrigues.jesus@outlook.com

Vieira, P. A. V.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itabira (MG), Brasil
pauloviana_87@hotmail.com

Coelho, A. L. M.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itabira (MG), Brasil
aurelio.coelho@unifei.com.br

Parentoni, M. F. C.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itabira (MG), Brasil
parentoni@unifei.edu.br

Almeida, J. E. L.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itabira (MG), Brasil
j.eugenio@unifei.edu.br

Nascimento, B. N.

Universidade Federal de Itajubá
(UNIFEI)
Itajubá (MG), Brasil
nadaibruno@gmail.com

Resumo – Os relés numéricos têm sido desenvolvidos de forma a aumentar a confiabilidade da proteção dos sistemas elétricos. Dentre os equipamentos que compõem sistemas de elevada potência, os transformadores estão expostos a eventos transitórios que podem levar sua proteção diferencial de corrente (ANSI 87) atuar indevidamente. Nesse sentido, é de fundamental importância compreender esses eventos para o adequado ajuste do dispositivo de proteção. Neste artigo são apresentados os resultados de uma avaliação da função ANSI 87 de um relé numérico comercial diante desses tipos de cenários: faltas externas, corrente de magnetização e saturação de transformadores de corrente. Para isso, um sistema de teste foi implementado em laboratório, o qual consistiu em configurar o relé, simular os transitórios de corrente e aplicá-los, por meio de uma caixa de teste programável, ao relé para avaliar sua resposta para cada um desses eventos. Os principais resultados e conclusões são apresentados.

Palavras-chave – Corrente de *inrush*, faltas externas, proteção diferencial, proteção de transformadores, relé numérico, saturação de transformadores de corrente.

I. INTRODUÇÃO

O estudo de formas eficazes na proteção do sistema elétrico de potência (SEP) é fundamental para a preservação da segurança das pessoas envolvidas e do patrimônio. Dentre as funções do sistema de proteção, pode-se destacar:

- Evitar danos ao equipamento primário;
- Proteger as pessoas envolvidas;
- Ilhar a parte do sistema defeituosa e garantir o funcionamento do sistema restante (coordenação e seletividade).

O transformador pode ser classificado como um dos principais dispositivos dentre os equipamentos encontrados no sistema elétrico de potência, uma vez que possui a função de adequar os níveis de tensão de acordo com o tipo de circuito.

Nesse contexto, garantir a sua proteção é imprescindível, visto que as falhas nos transformadores poderão ocasionar o desligamento parcial ou total do fornecimento de energia. Esses desligamentos podem acarretar em custos com reparos ao transformador, custo da energia não entregue aos consumidores e possíveis danos aos equipamentos adjacentes [1]. Segundo [2], para transformadores de potência maiores do que 10 MVA, a proteção diferencial percentual, juntamente com as outras proteções intrínsecas dos transformadores, apresenta maior confiabilidade e precisão. Contudo, de acordo com [3], o desempenho da proteção diferencial está sujeito a efeitos transitórios, tais como a saturação dos transformadores de corrente (TCs), a remoção de faltas externas próxima ao transformador e a corrente de magnetização devido à energização do transformador, que eventualmente fazem com que a corrente diferencial assuma valores indesejáveis, podendo acarretar a atuação indevida do relé, uma vez que o mesmo é projetado para atuar somente para faltas internas ao transformador.

Uma vez que ocorram os eventos supracitados, é necessária uma análise criteriosa da filosofia de proteção do equipamento, neste caso o transformador. Nesse sentido, este trabalho apresenta um estudo que avalia a resposta de um relé de proteção diferencial numérico frente a esses distúrbios. Para isso, simulações computacionais e testes laboratoriais foram realizados para obtenção dos resultados e levantamento das discussões.

Além dessa seção introdutória, este texto contém: uma breve fundamentação teórica na seção 2; os materiais e métodos empregados são apresentados na seção 3; os principais resultados e discussões são abordados na seção 4 e por fim tece-se uma conclusão geral sobre o trabalho na seção 5.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são abordados os conceitos gerais acerca da proteção diferencial, relés numéricos e sobre os distúrbios analisados para avaliar as funções de proteção do transformador.

A. Proteção diferencial

A proteção diferencial (ANSI 87) baseia-se na soma das correntes elétricas de entrada e saída do elemento protegido, também chamada corrente diferencial [4]. Apresenta-se na Fig. 1 o esquema de ligação de um elemento diferencial percentual.

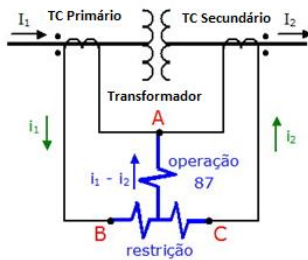


Fig 1. Esquema de ligação de um elemento diferencial percentual.

Conforme pode ser observado na Fig. 1, as correntes que alimentam as bobinas de restrição do relé diferencial são provenientes de TCs instalados em série com o primário e secundário do transformador de potência. Os sinais recebidos pelo relé são réplicas das correntes do sistema, salvo a relação de transformação. A atuação da proteção diferencial percentual depende da interação entre as bobinas de restrição e operação. Nos relés numéricos atuais, essa função fica a cargo da primeira característica de inclinação, também conhecida como *slope 1* (ver Fig. 2).

A Fig. 2 apresenta a característica da proteção diferencial do relé numérico aqui estudado, a qual se estende a outros modelos comerciais, onde no eixo das ordenadas têm-se a corrente de operação do relé (IOP) e no eixo das abcissas, a corrente de restrição do relé (IRT). O parâmetro U87P representa o *pickup* (valor que uma vez ultrapassado levará o relé a atuar) da corrente diferencial sem restrição, O87P é a corrente diferencial de *pickup*, e os *slopes 1* e *2* são as características de inclinação que delimitam as zonas de operação e restrição, sendo que o *slope 2* é dedicado para situações de faltas externas, a qual é detalhada nas próximas seções.

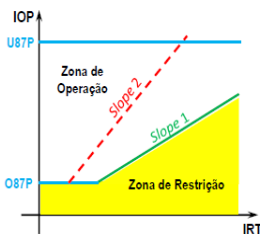


Fig. 2. Características de inclinação do relé diferencial. [5]

B. Relés numéricos

Os equipamentos utilizados na proteção de sistemas elétricos têm sido desenvolvidos de forma a aumentar a

confiabilidade da proteção. Sendo assim, durante os últimos anos, houve uma migração dos relés eletromecânicos para os relés numéricos [6]. Comparados aos equipamentos de proteção eletromecânicos, os relés numéricos apresentam um caráter multifuncional relacionado não apenas com as funções de proteção, como também com funções adicionais como oscilografias, filtragens de sinais, medições em tempo real, etc.

A partir desta tecnologia baseada em processamento digital de sinais, a filtragem dos sinais em relés de proteção tem a função de preservar a componente fundamental e rejeitar as distorções e ruídos, que poderiam vir a interferir no processo de coordenação da proteção. Além disso, funções que auxiliam na melhoria da confiabilidade da proteção têm sido implementadas nos relés diferenciais numéricos como, por exemplo, bloqueio e restrição de harmônicos e *slope 2*.

O bloqueio de harmônicos é uma função que, a partir da corrente harmônica medida, realiza uma comparação com um *pick-up* estipulado pelo usuário e, caso a corrente ultrapasse o valor deste, o relé bloqueia a operação e não atua. Por outro lado, a restrição de harmônicos não utiliza um limiar fixo para atuação, uma vez que, a partir da corrente harmônica medida, o elemento de restrição incrementa a posição do *slope 1* no eixo da corrente de *pick-up* diferencial (O87P).

O *slope 2*, é uma função de modo de segurança do relé que é acionada na presença de faltas externas. A detecção dessas faltas é baseada na comparação das correntes de operação e restrição. Como mencionado na subseção A, em caso de faltas externas a corrente de restrição tende a crescer proporcionalmente à soma das correntes I_1 e I_2 . Se o relé detecta uma mudança na corrente de restrição, sem que haja uma mudança proporcional na corrente de operação, o relé classifica a falta como externa e então entra em modo de alta segurança.

Todos os dados aquisitados nesses relés são manipulados numericamente e, dessa forma, grandezas analógicas, como tensão e corrente, são amostradas e convertidas e, posteriormente, comparadas com valores de ajuste (*pick-up*). Além das informações analógicas de corrente e tensão, os relés numéricos recebem outras informações, tais como: posição do disjuntor, posições das chaves seccionadoras, sinais de comunicação, entre outros [7].

C. Distúrbios analisados para avaliação da proteção ANSI 87

C.1 Corrente de inrush

Segundo [2], a corrente de *inrush* é um transitório de corrente, também conhecido como corrente de magnetização, que ocorre quando uma tensão é aplicada no transformador e o fluxo residual é diferente do valor instantâneo em regime permanente. Possíveis causas do surgimento das correntes de magnetização incluem: energização do transformador, reestabelecimento da tensão após eliminação de falta externa e energização de um transformador em paralelo a um transformador em funcionamento. Os fatores presentes no sistema que influenciam a corrente de *inrush* são: as características construtivas do transformador, tipo de material do seu núcleo, potência do transformador, a natureza e potência do sistema de geração, a relação X/R do sistema e o ponto de

energização com relação ao fluxo requerido. Uma corrente de magnetização típica contém harmônicos de segunda a quinta ordem e com elevada magnitude, podendo exceder a corrente nominal do transformador em até 10 vezes [8].

Por exceder a corrente nominal (em até 10 vezes), a corrente de magnetização pode ser erroneamente interpretada como uma corrente de curto-circuito. Nesses casos, o relé diferencial deve ser capaz de distinguir a corrente de *inrush* de uma falta interna, caso contrário, o mesmo atuará indevidamente.

C.2 Falta externa e saturação de TCs

Durante a remoção de uma falta externa fora da zona de proteção, mas suficientemente próxima ao transformador, ocorre uma situação similar à que acontece durante a energização do transformador. Isso ocorre devido a mudança do nível de tensão da falta para a pós-falta, que faz com que o fluxo presente no núcleo varie. De acordo com [9], as correntes que fluem pelo enrolamento primário durante a remoção da falta podem atingir valores de até 50 vezes a corrente nominal do transformador. Desse modo, essa corrente de falta elevada pode saturar o núcleo magnético e produzir uma distorção nas correntes secundárias do TC. Devido a essa distorção o relé de proteção pode atuar indevidamente, comprometendo a seletividade do sistema. Segundo [10], existem fatores que podem contribuir para a saturação dos TCs como: i) carga secundária ou *burden* acima do valor padrão; ii) fluxo remanescente e iii) nível da corrente de curto-circuito (componentes alternada e contínua dependem do valor da tensão no instante da falta).

III. MATERIAIS E MÉTODOS

O método consistirá na utilização da caixa de testes da Omicron para a geração dos sinais para aplicação no relé. A ferramenta computacional será implementada em ambiente MATLAB para avaliar a saturação do TC com a variação de seus parâmetros físicos.

A realização dos testes no relé de proteção foi baseada na metodologia apresentada na Fig. 3 e será dividido em sete partes, que são detalhadas a seguir.

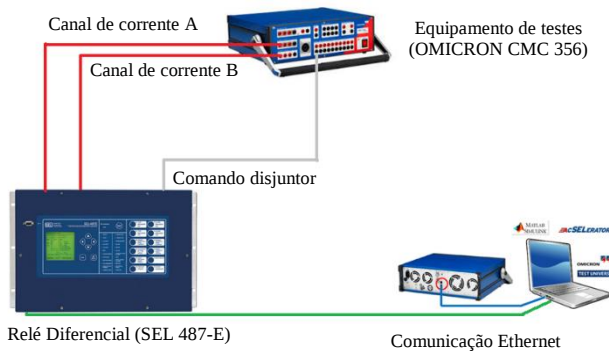


Fig. 3. Arquitetura do sistema de testes.

Os testes foram realizados conforme as seguintes etapas:

- Escolha do transformador de potência e TCs a serem utilizados.

- Simulação dos sinais de corrente e posteriormente conversão desses sinais para o formato COMTRADE, conforme o padrão [11].
- Parametrização da função de proteção diferencial do relé numérico de proteção de transformador SEL- 487-E, por meio do *software* AcSELEator;
- Realização da comunicação entre o computador e a mala de testes via cabo *ethernet*;
- Envio dos dados da parametrização para o relé via rede *ethernet*;
- Configuração do *hardware* responsável pela saída de corrente na mala de teste e ligação do cabeamento das saídas de corrente com as respectivas entradas do relé;
- Ligação da saída do sinal *trip* do relé com uma entrada digital da mala de testes para medir o tempo total da atuação da proteção em resposta aos distúrbios aplicados.

A parametrização do relé foi realizada considerando o modo de funcionamento da proteção diferencial e os cálculos necessários para seus ajustes, descritos no manual de instruções do equipamento [12]. Na Tabela 1 são apresentados os dados de placa do transformador utilizado neste estudo, os quais foram baseados para realizar a parametrização do relé SEL 487-E.

A partir dos dados presentes na Tabela 1, as correntes nominais do primário e secundário puderam ser calculadas, possibilitando definir a relação de transformação de corrente (RTC) dos TCs. Para o TC primário o RTC escolhido foi de 300/5 (A) e para o TC secundário foi de 2500/5 (A).

Tabela 1. Dados do transformador.

Potência	50 MVA
Número de fases	3
Frequência	60 Hz
Tensão nominal primário	138 kV
Tensão nominal secundário	13.8 kV
Conexão primário	Estrela (Y)
Conexão secundário	Delta (Δ)

Dessa forma, as correntes que passam pelas bobinas de restrição, conectadas no lado primário e secundário do transformador, serão iguais em condições normais de operação.

Com relação ao esquema de ligação dos TCs, optou-se por configurar ambos em estrela a fim de não provocar defasamentos angulares de um enrolamento para outro. Entretanto, a correta operação da proteção diferencial requer que as correntes do primário e secundário medidas pelo relé diferencial estejam em fase. Como o transformador em questão está conectado em estrela/delta, as correntes dos enrolamentos estarão defasadas 30° entre si. Se não houver uma compensação deste defasamento, o relé entenderá como uma condição de falta e irá operar indevidamente.

Para o ajuste o relé seleciona uma de suas matrizes para fazer a compensação angular do terminal S. Os valores das matrizes de compensação podem assumir um ajuste de 0 a 12 que fisicamente representam o número de incrementos de 30° no sentido anti-horário para sistema com rotação de fases ABC. Dessa forma, utilizou-se as matrizes de compensação 0 e 11, para isso, adotou-se o enrolamento primário do

transformador como referência e, para esse enrolamento, foi atribuída a matriz de compensação 0, haja vista que essa matriz não aplica um defasamento nas correntes de entrada. Então, considerando o defasamento de 30° para o enrolamento secundário, escolhe-se a matriz de compensação 11, que provoca um defasamento de -30° ou 330°.

O relé SEL 487-E disponibiliza um conjunto de entrada de sinais de corrente secundárias. No presente trabalho foram utilizados os canais S e T para avaliação da proteção diferencial. Para ajuste desses canais, é necessário atribuir valores de *taps* aos mesmos. Os *taps* têm a função de garantir o casamento das magnitudes das correntes oriundas dos TCs e que alimentam as bobinas de restrição do relé. Os valores dos *taps* S e T são calculados de acordo com a equação (1):

$$TAP = \frac{MVA * 1000}{V * RTC * \sqrt{3}} \quad (1)$$

onde MVA é a máxima potência do transformador, V e RTC são a tensão de linha e a relação de transformação do TC do enrolamento correspondente, respectivamente.

Além dos ajustes supracitados, é necessário também configurar os limites de atuação do relé, definidos pelos valores de *pickup* U87P e O87P, e os *slopes* 1 e 2. A inclinação 1 (Slope 1) considera as correntes diferenciais resultantes dos erros dos TCs e alterações de tap do transformador. A inclinação 2 (Slope 2) evita a operação indesejada do relé devido à saturação dos TCs quando submetidos a faltas externas de alta intensidade.

O valor da corrente de *pickup* sem restrição (U87P) tem o propósito de agir rapidamente para níveis elevados de corrente, sendo que para este estudo adotou-se o valor de 8 vezes o ajuste do TAP, conforme sugerido na literatura [12]. Para a corrente de *pickup* do elemento diferencial (O87P), definiu-se um valor de corrente que evitasse operações indesejáveis e obedecesse a equação (2):

$$0,1 * I_n = O87P * TAPS \quad (2)$$

Para esse estudo, a equação (2) resultou em um ajuste de O87P=0,5. Na parametrização dos *slopes* 1 e 2 considera-se os erros introduzidos por diversas fontes, como o erro dos TCs, o erro de medições e os erros causados pela corrente de excitação do transformador. Para compensação desses erros, o manual do relé sob estudo [12] orienta ajustes de *slopes* de 35% e 70% para os *slopes* 1 e 2, respectivamente.

No que remete aos ensaios realizados, as metodologias adotadas foram fundamentadas nas literaturas [10][12]. Os ensaios referentes à corrente de magnetização partem da avaliação das funções de restrição e bloqueio de harmônicos. Ambos os testes foram realizados com a injeção de correntes monofásicas com frequência fundamental e amplitude superior a corrente diferencial ajustada [13]. Em adição a esses sinais de corrente, uma segunda parcela foi introduzida contendo o harmônico testado. A amplitude desse harmônico foi elevada até o nível que fizesse com que o relé entrasse em função de bloqueio ou restrição. As análises para esses ensaios foram realizadas a partir da resposta do relé e do erro percentual do

limiar estipulado ($\pm 5\%$) fornecido pelo fabricante e pelo erro inserido pela mala de testes. Para o cálculo da corrente de frequência fundamental, utilizou-se o valor de 1,0 p.u. para a corrente de operação (I_{op}), maior que O87P. A partir da equação (3) e substituindo pelos valores pré-ajustados, obtém-se o valor de corrente de teste de 5,22 A.

$$I = I_{op} * TAP * A \quad (3)$$

No intuito de recriar condições mais próximas das encontradas em campo, foram simulados, por meio do *software Harmonics* da Omicron, sinais representando a corrente de *inrush*. As conclusões sobre os resultados foram respaldadas nas oscilografias filtradas e não filtradas do sinal injetado, as quais são apresentadas na seção IV.

Já a metodologia para avaliar as faltas externas e a saturação do TC foi fundamentada na simulação dos sinais secundários a partir da rotina de *Matlab* proposta em [10]. Por meio deste algoritmo, foram gerados sinais saturados em decorrência da corrente de falta simétrica e assimétrica, *burden* e fluxo remanescente. Os sinais resultantes deste algoritmo, em formato COMTRADE, foram carregados na mala de testes da Omicron por meio do *software Advanced Transplay*. Os sinais reproduzidos pela mala de teste são injetados no relé para verificar sua resposta. Os resultados são avaliados considerando a atuação ou não do relé e a partir das análises das oscilografias dos eventos, como apresentado na seção IV.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões dos testes realizados considerando os distúrbios descritos nas seções anteriores. As análises realizadas são fundamentadas pela literatura [10], [12], [13] e pelos valores ajustados no relé de proteção sob teste.

A. Faltas externas

A Fig. 4 apresenta os pontos testados para avaliar a função de modo de segurança contra faltas externas. Os pontos foram escolhidos de forma a testar o posicionamento do segundo *slope*. As Tabelas 2 e 3 expõem os resultados obtidos para os pontos testados. O primeiro ponto testado é localizado abaixo do *slope* 2.

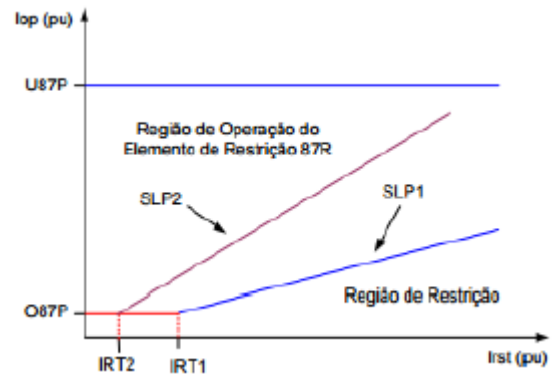


Fig. 4. Pontos de teste para avaliação da operação de falta externa.

Durante o primeiro estado do teste 1 o relé entrou em modo de segurança e mudou a característica de inclinação para o segundo *slope*, isso foi observado pelo *relay bit* CON A (que é uma unidade lógica do relé que é alterna seu valor quando entra em modo de segurança). Nesse contexto é valido afirmar que o teste ocorreu como esperado, visto que a região abaixo do *slope* 2 é região de restrição durante o modo de segurança. De forma similar ao primeiro teste, o relé entrou em modo de segurança durante o primeiro estado. Entretanto, devido à julgar que o segundo ponto testado se encontrava fora da zona de restrição, o relé, mesmo estando em estado de segurança, como esperado, atuou para faltas acima do *slope* 2.

Tabela 2. Resultados do primeiro ponto de teste.

Teste 1	Corrente Primária		Corrente Secundária		Atuação
	Fase (A)	Ângulo (°)	Fase (A)	Ângulo (°)	
Estado 1	3,55	180	9,87	0	CON A, diferencial não atuou
Estado 2	11,19	180	23,92	0	

Tabela 3. Resultados do segundo ponto de teste.

Teste 2	Corrente Primária		Corrente Secundária		Atuação
	Fase (A)	Ângulo (°)	Fase (A)	Ângulo (°)	
Estado 1	3,55	180	9,87	0	Atuou elemento diferencial
Estado 2	11,41	180	23,13	0	

B. Corrente de inrush

Os resultados obtidos durante os ensaios de bloqueio e restrição de harmônicos, realizados para avaliar o relé diferencial, estão predominantemente de acordo com os especificados pelos limites impostos pelo fabricante ($\pm 5\%$). A Tabela 4 apresenta os testes realizados para avaliação da função de proteção de corrente de *inrush*.

Os testes trifásicos apresentaram condições de bloqueio e restrição satisfatórios. Ressalta-se que durante os testes, as parametrizações do relé foram alteradas de modo a garantir a eficiência da função de proteção. Nos casos 1 e 3 as funções de bloqueio e restrição de harmônicos foram ajustadas de modo a evitar a atuação do elemento diferencial. Por outro lado, o caso 2 foi realizado com uma proteção subdimensionado o que ocasionou na atuação do elemento diferencial.

A oscilografia apresentada na Fig. 5 é resultado do teste 3 da Tabela 5. Nesse teste o relé estava configurado para o nível de harmônico esperado, de modo que o relé entrou em bloqueio e não atuou, conforme era esperado.

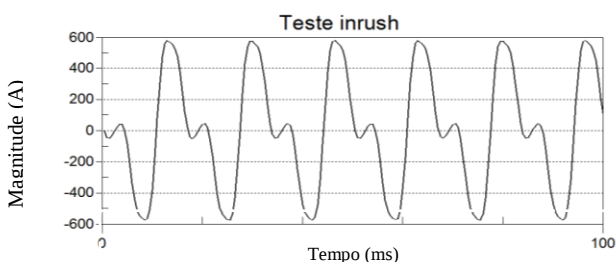


Fig. 5. Oscilografia da fase A do teste 3 da Tabela 4.

Tabela 4. Testes realizados para avaliar restrição e bloqueio de harmônicos.

Teste	Função testada	Fase	Componente Harmônica	Valor ajustado ¹	Corrente harmônica de atuação	Resultado
				%	A	Atua/ Não atua
1	Restrição	A	2	15	0,510	Atua
2				55	1,860	Atua
3			4	15	0,510	Atua
4				55	1,880	Atua
5	Bloqueio	A	2	15	0,8352	Atua
6				55	2,975	Atua
7			4	15	0,8352	Atua
8				55	2,923	Atua
9	Restrição	B	2	15	0,522	Atua
10				55	1,860	Atua
11			4	15	0,522	Atua
12				55	1,880	Atua
13	Bloqueio	B	2	15	0,8352	Atua
14				55	2,871	Atua
15			4	15	0,832	Atua
16				55	2,923	Atua
17	Restrição	C	2	15	0,522	Atua
18				55	1,860	Atua
19			4	15	0,522	Atua
20				55	1,9	Atua
21	Bloqueio	C	2	15	0,8352	Atua
22				55	2,923	Atua
23			4	15	0,8352	Atua
24				55	2,923	Atua

Obs: ¹ Valores ajustados referentes a corrente de operação calculada (5,22A).

Tabela 5. Testes realizados para avaliar restrição e bloqueio de harmônicos.

Teste	Corrente	Harmônicos				Atuação elemento diferencial	Resultado
	A	% (relação a fundamental)					Aprovado / Reprovado
		2	3	4	5		
1	5,22	64	0	9	7	N	Aprovado
2	13,92	64	9	8	5	S	Aprovado
3	13,92	64	9	7	5	N	Aprovado

C. Saturação de TC

Para demonstrar os efeitos da saturação do núcleo do TC, foram escolhidos 7 casos de modo a possibilitar uma comparação entre eles. O TC escolhido tem uma relação de transformação de 300/5 A e um *burden* padrão de $(0,5 + j0,866) \Omega$. A Tabela 8 expõem os resultados obtidos para os sinais testados.

A partir dos resultados dos testes, observa-se que a adição do fluxo remanescente entre os casos 1 e 2 da Tabela 7, não alterou, de forma significativa o nível de distorção harmônica total.

Nos casos com falta assimétrica observa-se que com o aumento da relação X/R, maior a duração do decaimento

exponencial e, em decorrência, a forma de onda permanece distorcida durante um maior número de ciclos.

Para os casos 5 e 6 da Tabela 8, onde foram analisadas as interferências do *burden* na saturação do núcleo, constatou-se que esse tem grande influência, haja vista que o nível de harmônicos presente no sinal aumentou em 55%.

Tabela 7. Características dos sinais utilizados nos testes de saturação do transformador de corrente.

Teste	Múltiplo da corrente	Fluxo remanescente (p.u.)	Burden (p.u.)	X/R	DHT ¹ (%)
1	5	0	4	17	73,03
2	5	0.5	4	17	75,23
3	10	1	2	5	54,24
4	10	1	2	20	74,63
5	20	0	5	15	114,65
6	20	0	1	15	73,95
7	30	0.6	3	17	117,84

Obs: ¹ DHT – Distorção harmônica total: Relação entre o valor eficaz de distorção harmônica em relação à componente fundamental.

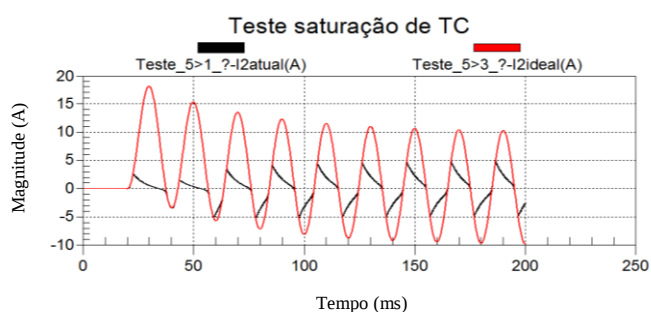


Fig. 6. Oscilografia obtida no caso 5 da Tab.8.

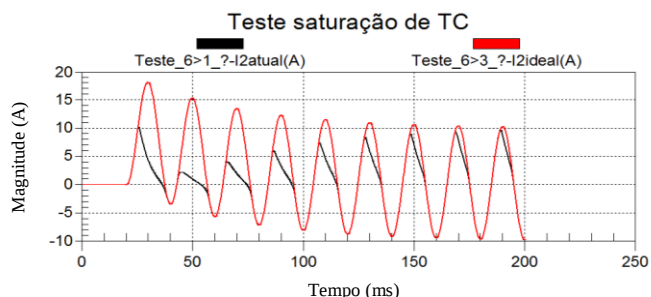


Fig. 7. Oscilografia obtida no caso 6 da Tab.8.

As Figs. 6 e 7 apresentam as oscilografias obtidas durante esses ensaios. É válido mencionar que para nenhum caso o relé atuou, o bloqueio de harmônico foi responsável pelo bloqueio da operação do relé.

V. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada uma análise sobre a influência dos efeitos transitórios em um relé comercial de proteção diferencial para transformadores. O estudo considerou os efeitos causados pela saturação de transformadores de corrente, corrente de magnetização e faltas externas.

Quanto aos testes das funções de proteção para corrente de magnetização, pode-se concluir que, mediante um correto ajuste das funções de bloqueio e restrição de harmônicos, o relé diferencial se mostra eficaz na detecção e bloqueio da

atuação dessas correntes. Outras formas de amenizar a atuação indevida em decorrência das correntes de *inrush* são bloqueio no funcionamento do relé nos primeiros ciclos de energização do transformador e energização controlada do transformador através de disjuntores especiais.

Com base nas análises realizadas sobre os resultados dos testes de faltas externas e saturação de TCs, pode-se afirmar que os efeitos causados devidos à saturação do núcleo, de fato, têm grande impacto na proteção diferencial. Ainda assim, o relé testado prova eficiência na detecção de alguns casos, graças ao conteúdo harmônico presente. Vale ressaltar ainda que, para as faltas externas, outro meio de mitigação pode ser considerado: a inserção do segundo *slope*. De maneira a otimizar o funcionamento do relé, algumas medidas podem ser tomadas como: evitar religamentos sucessivos do transformador e atentar-se à carga secundária do TC sempre que um novo medidor for instalado.

De forma geral, podem-se citar as seguintes contribuições do trabalho:

- Mostrar como um sistema de testes, seja computacional ou por meio de práticas laboratoriais, pode auxiliar previamente aos testes de comissionamento da proteção diferencial de transformadores de potência;
- A disponibilização de subsídios para realização de testes e para ajustes das funções de falta externas e corrente *inrush*.

REFERÊNCIAS

- [1] Schweitzer, E. O. (2010). Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems (Ilustrada ed., Vol. 1, pág. 107-125). Schweitzer Engineering Laboratories.
- [2] Blackburn, J. L. (2014). Protective Relaying: Principles and Applications (ed., Vol. 4, pág. 295-362). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [3] Stringer, N. T. (1995, 10). Real-time transient testing and performance of transformer differential relays. IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, Vol. 2, 1142-1150.
- [4] Kindermann, G. (2006). Proteção de Sistemas elétricos de Potência. (1 ed., Vol. 2, pág. 94-176). Florianópolis, SC: Edição do Autor, vol.1.
- [5] Silveira, P. M. Villegas, C. A. and Coelho, A. L. (2013) – Testes de proteção de transformadores, Curso de especialização em sistemas elétricos, Modulo 8 – GQEE/CESE.
- [6] Penariol, G. S. Paulino, M. E. C. (2010) - A Evolução de Sistemas de Proteção e Modelos para Testes de Relés de Proteção. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2012), Goiás, de 15 a 18 de maio de 2012.
- [7] Silva, R.A. (2008) – Comportamento da Função de Proteção de Sobrecorrente Instantânea frente a Distorções Harmônicas nos Relés de Proteção Numéricos. Trabalho de Conclusão de Curso, USP, 2008.
- [8] Ling, P.C.Y. e Basak (1988), A. Investigation of magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer. IEEE Transactions on Magnetics, vol.24, n.6, p.3217-3222.
- [9] Horowitz, S. H. and Phadke, A. G. (1992). “Power System Relaying”, John Wiley and Sons Inc.

- [10] Coelho, A. L. M. (2011) “Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o impacto em relés de sobrecorrente numéricos”, MSc. dissertation, Electrical Engineering Department, Itajubá Federal University, Itajubá.
- [11] IEEE (1999) Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, IEEE Std. C37.111-1999, Oct. 1999.
- [12] SEL, 487E (2008). Relay Current Differential and Voltage Protection, Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories.
- [13] Costello, D. Young, J. (2010). Single-Phase Testing of the SEL-487E Harmonic Blocking and Restraint Functions. Application Guide, 41-6.