

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

DETECÇÃO DE INRUSH EM TRANSFORMADORES COM BAIXO CONTEÚDO DE SEGUNDO HARMÔNICO – ESTUDO DE CASO

PAULO LIMA(1); DOUGLAS DE OLIVEIRA BRUNISMANN(1); DANIEL BECKER(3); ADILSON FRANCO KOTRYK(4); MARCELO ALVES BETTEGA(4)
SEL(1); CEEE-GT(3); COPEL DISTRIBUIÇÃO(4)

RESUMO

O trabalho tem como objetivo avaliar como o baixo nível de segundo e quarto harmônico na corrente de magnetização transitória de transformadores de potência afeta a segurança da função diferencial destes equipamentos, podendo levar a operação indevida da proteção 87T durante a energização do transformador. O trabalho faz uma abordagem teórica para explicar o motivo deste baixo nível de segundo harmônico nos novos transformadores. Baseado em casos reais, o trabalho apresenta quais estratégias de proteção podem ser adotadas para aumentar a segurança da função diferencial durante o *inrush* e como estas estratégias podem comprometer ou não a confiabilidade da função diferencial.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção diferencial, transformadores, *inrush*, ultrassaturação.

1.0 - INTRODUÇÃO

A proteção diferencial de transformadores (87T) é uma das principais funções de proteção de transformadores com potências nominais acima de 5 a 10 MVA (1). Baseada nas equações de equilíbrio de amperes-espiras do transformador protegido (2), a função diferencial 87T responde às faltas no transformador enquanto mantém o equilíbrio para carga e faltas externas. Por outro lado, a corrente de magnetização do transformador durante condições de *inrush* e sobre-excitação também causam o surgimento do sinal diferencial para o elemento 87T (2), isso ocorre porque o ramo de magnetização no modelo do transformador é uma derivação *shunt*, conforme pode ser visto na Figura 1.

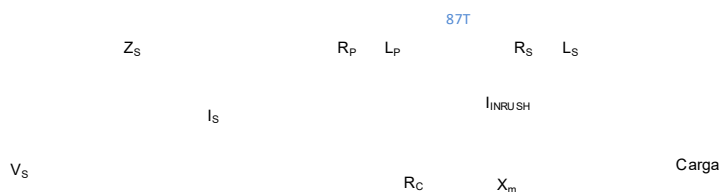


FIGURA 1 – Circuito equivalente monofásico usado para análise da energização do transformador

As correntes de *inrush* do transformador podem chegar a ordens de cinco a sete vezes a corrente nominal do transformador e caso não sejam devidamente identificadas podem causar a operação indevida da proteção. Tipicamente as correntes de *inrush* são ricas em harmônicos de ordem par, principalmente 2º e 4º harmônicos. Isto permite que a corrente de *inrush* seja diferenciada da corrente de curto-circuito e que a função 87T seja bloqueada ou que tenha sua atuação restringida. O método de bloqueio cruzado por harmônico e o método de restrição por harmônicos são amplamente utilizados e são os métodos mais comuns para evitar a operação indevida da proteção 87T durante a energização [3]. Ocorre que alguns transformadores de potência, especialmente os novos projetos com o material do núcleo melhorado para redução das perdas, apresentam baixos níveis de 2º e 4º harmônico na corrente de magnetização transitória e, como resultado, os elementos 87T enfrentam desafios de segurança (1).

Este artigo mostra casos reais de correntes de *Inrush* com baixo nível de 2º e 4º harmônico e avalia a efetividade de soluções recentes de detecção de *Inrush* cujo princípio de operação é baseado na forma de onda e não no conteúdo harmônico.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE *INRUSH* DOS TRANSFORMADORES

A Figura 2 mostra a construção da corrente de energização de um transformador. O transformador é energizado no instante t_0 , neste momento a tensão é igual a zero, porém já havia um fluxo magnético residual no transformador. Com o aumento da tensão instantânea também ocorre o aumento do fluxo magnético, porém em t_1 o fluxo ainda está na região linear da curva de excitação (Fluxo vs $I_{EXCITAÇÃO}$) e a corrente de excitação aumenta linearmente com a tensão. No instante t_3 o fluxo entra na região de saturação, a indutância do ramo de magnetização atinge o seu valor mais baixo, resultando em uma corrente maior sendo drenada da fonte (1).

A partir do instante t_3 a corrente de excitação passa a apresentar valores elevados devido a baixa indutância do ramo magnetizante. Adicionalmente, a transição entre a região linear e a de saturação faz com que a corrente apresente distorções.

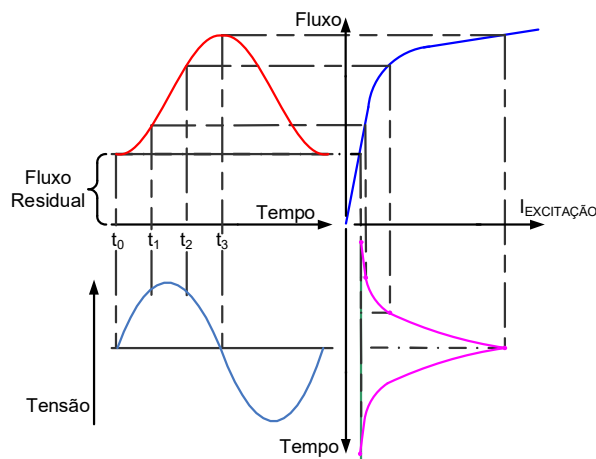


FIGURA 2 – Relação da tensão, fluxo no núcleo e corrente de magnetização de um transformador

A corrente de energização de um transformador será determinada pelos três fatores seguintes:

- Fluxo residual no núcleo do transformador
- Ponto na onda de tensão no qual o transformador é energizado.
- A magnitude da impedância da fonte e, em menor grau, a magnitude da impedância de dispersão do transformador.

A Figura 3 mostra os valores instantâneos das correntes durante a energização real de um transformador de 25 MVA, 138/13 kV. Observe que as correntes são elevadas, distorcidas e que há predominância do segundo e quarto harmônico. Os valores harmônicos percentuais apresentados são calculados entre os instantes T1 e T2, no primeiro ciclo do *Inrush* e, para o segundo harmônico, os percentuais das correntes das fases A, B e C são de 41%, 48% e 80%, respectivamente.

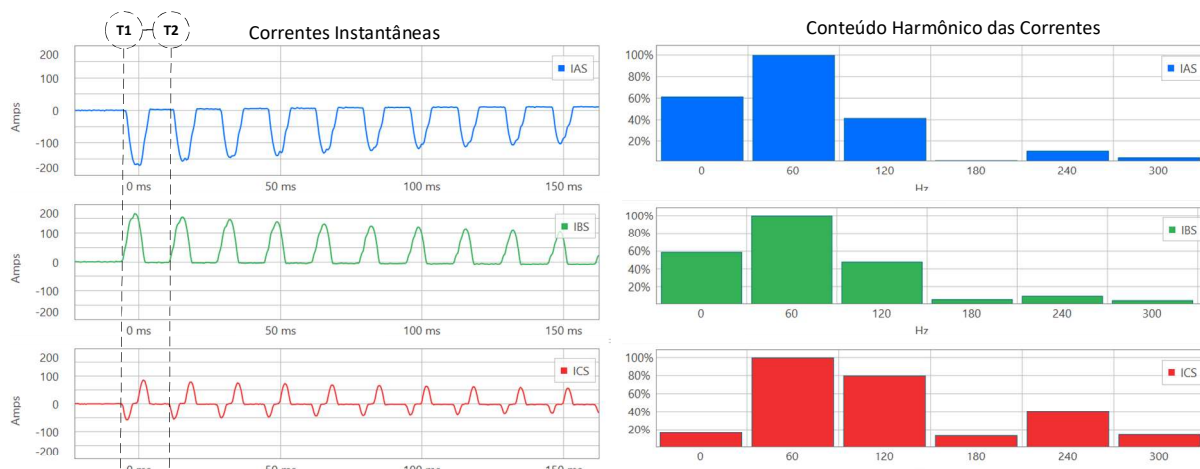


FIGURA 3 – Correntes de fase e conteúdos harmônicos calculados entre os intervalos de tempo T1 e T2

Para garantir a segurança do elemento diferencial durante a energização do transformador, normalmente utiliza-se o conteúdo harmônico da corrente diferencial da fase correspondente para diferenciar a condição de energização de uma condição de falta.

Nos esquemas de bloqueio por harmônicos, o elemento diferencial é bloqueado se a porcentagem do conteúdo harmônico da corrente diferencial for maior do que um valor pré-ajustado, normalmente entre 15 e 20%. O método de bloqueio cruzado, onde a detecção e conteúdo harmônico em uma das fases faz o bloqueio do elemento diferencial em todas as fases, é preferencialmente utilizado por apresentar maior segurança no caso de uma das fases apresentar baixo conteúdo harmônico. Por outro lado, o método de bloqueio cruzado pode atrasar a atuação do elemento 87T no caso de faltas internas durante a energização (3).

Já nos esquemas de restrição por harmônicos, o conteúdo harmônico da corrente diferencial é somado na corrente de restrição, de forma que a operação do elemento diferencial seja dificultada. Como neste caso não há um bloqueio, mas somente um aumento da restrição, o elemento fica disponível para atuar no caso de uma falta interna durante a energização. A combinação dos elementos de restrição e bloqueio é normalmente aplicada para garantir segurança e confiabilidade da função 87T (3).

Na Figura 3 pode-se observar que o conteúdo harmônico em todas as fases foi bastante superior aos ajustes típicos utilizados, não apresentando nenhum problema de segurança para função 87T, tanto pelo método de restrição quanto pelo método de bloqueio por harmônicos.

3.0 - ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES COM BAIXO CONTEÚDO HARMÔNICO

Nesta seção são mostrados casos reais de energização de transformadores com baixo conteúdo harmônico que criam desafios para sua identificação e são avaliadas estratégias que poderiam ser adotadas em termos de ajustes ou lógicas customizadas a nível de usuário para aumentar a segurança dos esquemas de detecção baseado em harmônicos.

3.1 – Caso 1 – Operação do Elemento 87T Durante Energização Devido ao Baixo Conteúdo de Harmônico na COPEL-D

Durante a energização de um transformador de 42 MVA, 69 kV/13,8 kV da COPEL-D, houve atuação do elemento diferencial 87T. A Figura 4 mostra as formas de ondas das correntes instantâneas e seus respectivos conteúdos harmônicos para este evento. Pode-se observar que as correntes de fase IAS, IBS e ICS apresentam características típicas de corrente de *inrush*, porém o conteúdo de 2º harmônica na fase A, calculado entre os instantes T1 e T2, está em 8,6%, abaixo dos níveis tradicionais. Nas fases B e C o nível de segundo harmônico neste período foi de 16% e 38%, respectivamente. Pode-se observar que a fase A é a menos distorcida, apresenta maior deslocamento e maior magnitude, na próxima seção será apresentada uma explicação para esta característica.

Esta característica causou a operação do elemento diferencial por restrição por harmônicos da fase A (87RA) durante a energização. Na oscilografia pode-se observar a operação do elemento diferencial de fase (87R) e o trip do transformador para faltas internas (TRPXFMR). No relé em questão estão habilitados tanto o elemento baseado na restrição por harmônicos quanto o elemento baseado no bloqueio por harmônicos e somente o elemento por restrição operou. Como o elemento de bloqueio é cruzado, a alto percentual de harmônico na fase C foi suficiente para manter os elementos das fases A e B também bloqueados.



FIGURA 4 –Registro oscilográfico da operação do elemento 87T durante a energização – COPEL-D

3.2 – Caso 2 – Operação do Elemento 87T Durante Energização Devido ao Baixo Conteúdo de Harmônico na CEEE-GT

Durante a energização de um transformador de 83 MVA, 230 kV/69 kV da CEEE-GT, houve atuação do elemento diferencial 87T. A Figura 5 mostra as formas de ondas das correntes instantâneas e seus respectivos conteúdos harmônicos para este evento. Pode-se observar que as correntes de fase IAS, IBS e ICS apresentam características típicas de corrente de *inrush*, porém o conteúdo de 2º harmônica na fase B, calculado entre os instantes T1 e T2, está em 2,1%, muito abaixo dos níveis tradicionais. Nas fases A e C o nível de segundo harmônico neste período foi de 32% e 26%, respectivamente. Pode-se observar que a fase B é a menos distorcida, apresenta maior deslocamento e maior magnitude, como no Caso 1 para a fase A.

Esta característica causou a operação do elemento diferencial por restrição por harmônicos da fase A (87RB) durante a energização. Na oscilografia pode-se observar a operação do elemento diferencial de fase (87R) e o trip do transformador para faltas internas (TRPXFMR). No relé em questão estão habilitados tanto o elemento baseado na restrição por harmônicos quanto o elemento baseado no bloqueio por harmônicos e somente o elemento por restrição operou. Como o elemento de bloqueio é cruzado, a alto percentual de harmônico na fase C foi suficiente para manter os elementos das fases A e B também bloqueados, como ocorreu também no Caso 1.



FIGURA 5 –Registro oscilográfico da operação do elemento 87T durante a energização – CEEE-GT

3.3 - Soluções Baseadas em Ajustes e Lógica a Nível de Usuário

Para os eventos anteriores, algumas soluções a nível de ajustes ou lógicas de usuários poderiam ser avaliadas para melhorar a segurança da função diferencial durante a energização. A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, as

possíveis soluções e suas desvantagens.

Tabela 1 – Possíveis Soluções para Aumentar a Segurança da Função 87T

Solução	Desvantagens
Redução dos limiares de bloqueio e restrição por harmônicos para níveis abaixo do tradicionalmente aplicado (15 e 20%)	Eventos internos com leve atuação do TC poderiam levar ao bloqueio da função 87T. No Caso 2 a corrente IBS apresentou conteúdo de segundo harmônico próximo de zero e continuaria não sendo detectado mesmo com ajustes mais baixos.
Utilizar apenas o elemento baseado no princípio de bloqueio cruzado e não utilizar o elemento baseado em restrição por harmônicos.	No caso de falta interna durante a energização o elemento de bloqueio cruzado pode manter a função 87T bloqueada durante todo o período de energização do transformador, resultando em uma tempo muito elevado de atuação
Temporizar a atuação do elemento 87T durante o <i>Inrush</i> utilizando um comparador de corrente sensível ou mudança do estado do disjuntor	No caso de falta interna durante a energização o elemento 87T ficaria bloqueado por um longo período, de acordo com o tempo de bloqueio ajustado.
Ajustes mais conservadores da função 87T em termos de corrente diferencial mínima para operação e inclinação da característica diferencial percentual	Redução da sensibilidade para detecção de faltas internas

Apesar de todas elas resultarem em um aumento na segurança da função 87T, elas possuem um custo em termos de confiança ou velocidade da função 87T no caso de uma falta inter. A referência (1) faz uma análise detalhada de cada uma destas possíveis soluções.

3.4 – Explicação para o Baixo Conteúdo Harmônico na Corrente de *Inrush*

Nos últimos anos, tem sido cada vez mais frequente casos de energização de transformadores com baixo conteúdo harmônico como os mostrados nos Casos 1 e 2. Isso leva a operação indevida do elemento 87T, causa indisponibilidade extra de um importante ativo e gera custos extras para as concessionárias, uma vez que a atuação da função 87T requer uma investigação de indícios de falha interna.

O baixo conteúdo harmônico ocorre devido a um comportamento conhecido como ultrasaturação do núcleo do transformador, fenômeno que ocorre quando tanto o pico positivo quanto o pico negativo da densidade de fluxo magnético estão na região de saturação na característica de excitação do transformador.

Assuma uma característica de magnetização com duas regiões lineares, como mostrado na Figura 6. Observe que devido ao fluxo residual tanto o fluxo mínimo quanto o fluxo máximo magnético estão acima do nível de saturação. Nesta situação, o transformador absorve uma corrente muito grande, mas a forma de onda da corrente não é distorcida, uma vez que não ocorre a transição entre a condição saturada e não saturada (1). O núcleo do transformador está operando na região saturada, mas a indutância de magnetização, embora baixa, é constante, obtendo-se assim uma corrente que é similar a uma onda senoidal. Este caso é referido como ultrasaturação. Como a forma de onda da corrente não é distorcida durante a ultrasaturação, o conteúdo harmônico é extremamente baixo.

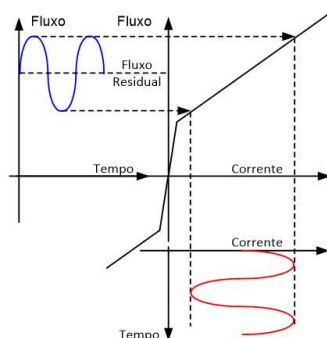


FIGURA 6 – Corrente de excitação e fluxo magnético característicos da ultrasaturação

A referência (1) mostra que este fenômeno é favorecido principalmente nos projetos de novos transformadores que apresentam nível de fluxo residual mais baixo e menores perdas.

Dada a ocorrência cada vez mais frequente deste tipo de comportamento na corrente de *Inrush* e as consequências da atuação da função 87T durante uma energização sem faltas de um transformador, surge a necessidade do desenvolvimento de novos métodos para detecção de corrente de energização transitória.

4.0 - UM NOVO ALGORITMO BASEADO NO RECONHECIMENTO FORMA DE ONDA

A Figura **Erro! Fonte de referência não encontrada.**7 mostra as correntes de fase para o evento do Caso 2. Como já foi descrito, a corrente da fase B é a que apresenta maior magnitude e menor distorção, devido ao efeito da ultrasaturação apresentado na secção anterior. Mesmo com esta baixa distorção, fica claro que o comportamento das correntes é condizente com as correntes de energização do transformador, principalmente devido ao momento em que todas as correntes ficam constantes e apresentam uma característica plana. Este comportamento está destacado na Figura 7 e é chamado de *Dwell-Time*.

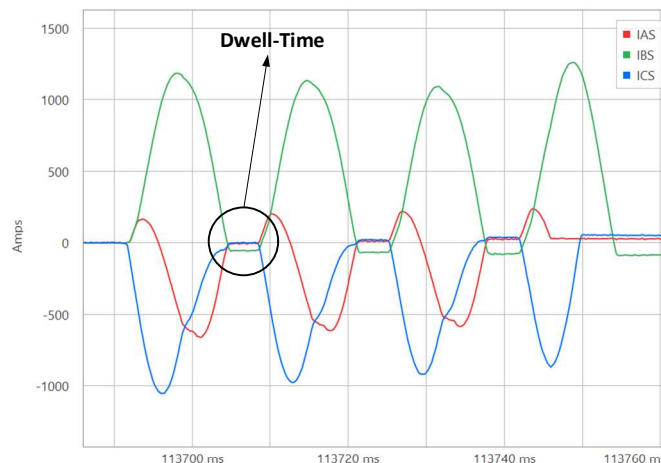


FIGURA 7 – Correntes de fase do Caso 2 e o *Dwell-Time*

Uma nova função de detecção de *inrush* baseado no *Dwell-Time* é apresentado em (1). Esta função utiliza os valores instantâneos das correntes diferenciais e a taxa de variação das correntes diferenciais. De forma simplificada, o *Dwell-Time* é identificado pela verificação da não variações nas correntes diferenciais e na taxa de variação das correntes diferenciais. O IED da referência (4) implementa este algoritmo e, identificando esta condição ocorre a atuação do sinalizador da variável interna INRUSH, que é utilizada para realizar o bloqueio da função 87T.

O novo esquema pode atuar correlacionando informações de todas as três fases ou de forma monofásica, atendendo assim transformadores com três, quatro ou cinco “pernas” ou ainda bancos de transformadores.

4.1 – Elemento de Desbloqueio da Função de Detecção de *Inrush*

No caso de uma falta interna durante *Inrush*, o novo algoritmo necessita de aproximadamente 1 ciclo para desabilitar o sinal de bloqueio e liberar a atuação da função 87T. Apesar de não ser um tempo muito elevado, é possível reduzi-lo através de um elemento de detecção de falta interna.

A corrente de *inrush*, se for alta, é praticamente unipolar, como mostrado na Figura 7. Ela torna-se mais simétrica com o decaimento do *inrush* para uma corrente de excitação em regime. A Figura 8 (a) mostra a corrente diferencial para um caso de *inrush* registrado no campo com uma corrente de falta simulada sobreposta na forma de onda de *inrush* aos 72 milissegundos (1). A corrente é negativa e repetidamente atravessa o limite negativo (linha azul) na Figura 8 (a). Ao mesmo tempo, contudo, ela não atravessa o limite positivo simetricamente posicionado (linha vermelha). Observe, entretanto, que quando acontece uma falta interna, a corrente atravessa o limite negativo; pouco tempo depois, ela cruza o limite positivo; e assim por diante. Esta observação pode ser usada para conceber um novo elemento de sobrecorrente bidirecional, como representado na Figura 8 (b). Na parte inferior da Figura 8 (b) são indicadas as detecções de limiar positivo (em vermelho), de limiar negativo (em azul) e de atuação do elemento quando há a detecção da bidirecionalidade (em magenta).

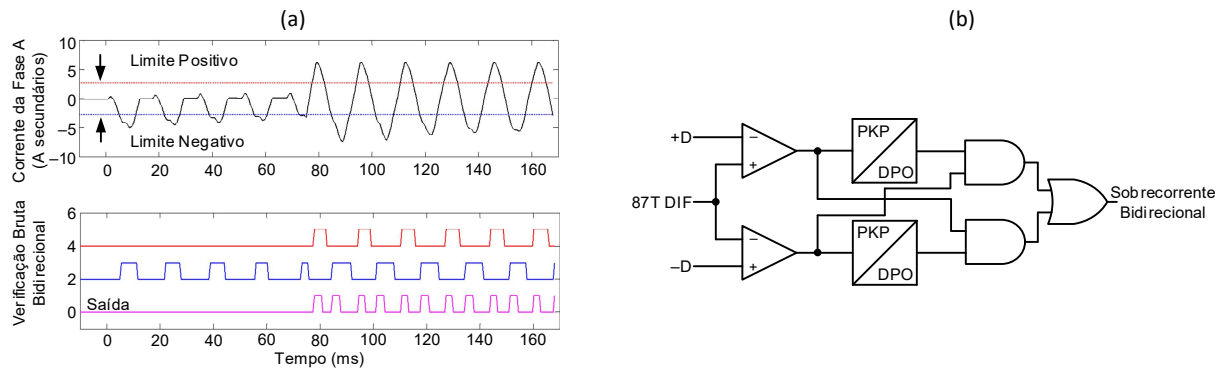


FIGURA 4 – Corrente de falta comparada com os limites positivo (vermelho) e negativo (azul) (a) e elemento de sobrecorrente bidirecional (b)

O novo elemento de sobrecorrente diferencial instantâneo bidirecional pode ser aplicado para desbloquear o elemento diferencial com o intuito de acelerar a operação da função 87T quando há uma falta interna durante *Inrush* e pode ser aplicado diretamente para trip de uma maneira similar ao tradicional elemento diferencial sem restrição (87U). A aplicação de trip direto, iniciando um trip sem qualquer restrição para falta passante ou bloqueio por harmônico, deve utilizar ajustes mais elevados por segurança, mas ele ainda pode ser muito mais sensível em comparação com o elemento que responde à magnitude filtrada da corrente diferencial.

A Figura 9 mostra como os novos elementos são implementados em (4), sendo:

- 87T – elemento diferencial tradicional, baseado no bloqueio e/ou restrição por harmônicos
- INRUSH – detecção de *Inrush* pela função de reconhecimento de forma de onda baseado no *Dwell-Time*
- Sobrecorrente Bidirecional (1) – novo elemento de desbloqueio da lógica de detecção de *Inrush*
- Sobrecorrente Bidirecional (2) – novo elemento aplicado para disparar direto no caso de faltas internas, sem restrição

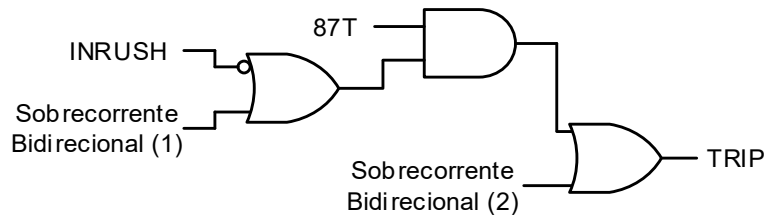


FIGURA 5 – Aplicações dos novos elementos

5.0 - TESTES DA NOVA FUNÇÃO BASEADA NO DWELL-TIME

Para verificar o comportamento da função de detecção de *Inrush* baseada no *Dwell-Time*, realizou-se a injeção dos sinais de corrente dos eventos de energização que causaram a operação do 87T apresentados anteriormente.

5.1 - Caso 1 – Transformador de 42 MVA, 69 kV/13,8 kV da COPEL-D

Os arquivos COMTRADE do Caso 1 foram utilizados para avaliar o comportamento do novo algoritmo implementado no IED da referência (4). O resultado foi o bloqueio com sucesso do elemento diferencial durante a energização do transformador, evitando assim a operação indevida do elemento 87T, conforme mostrado na Figura 10. Observe que a condição de *Inrush* foi detectada nas três fases (INRUSH_A, INRUSH_B, INRUSH_C) e nenhum dos respectivos elementos diferenciais atuaram (87RA, 87RB, 87RC).

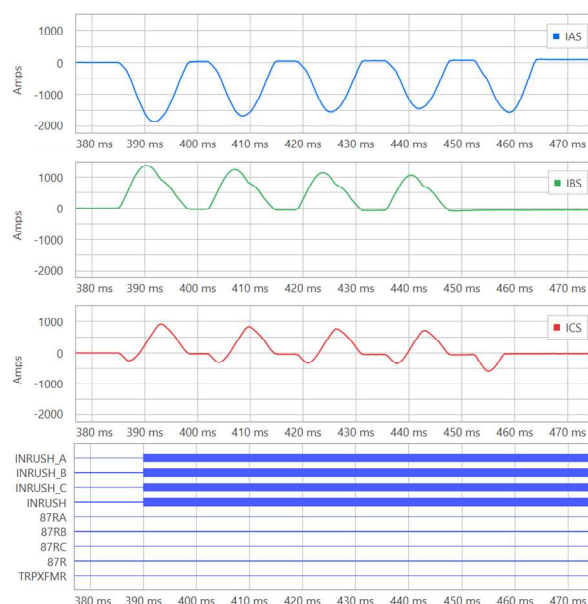


FIGURA 6 – Comportamento da nova lógica de detecção de *Inrush* para o Caso 1

5.2 - Caso 2 – Transformador de 83 MVA, 230 kV/69 kV da CEEE – GT

Os arquivos COMTRADE do Caso 2 foram utilizados para avaliar o comportamento do novo algoritmo implementado no IED da referência (4). O resultado foi o bloqueio com sucesso do elemento diferencial durante a energização do transformador, evitando assim a operação indevida do elemento 87T, conforme mostrado na Figura 11. Observe que a condição de *Inrush* foi detectada nas três fases (INRUSH_A, INRUSH_B, INRUSH_C) e nenhum dos respectivos elementos diferenciais atuaram (87RA, 87RB, 87RC).

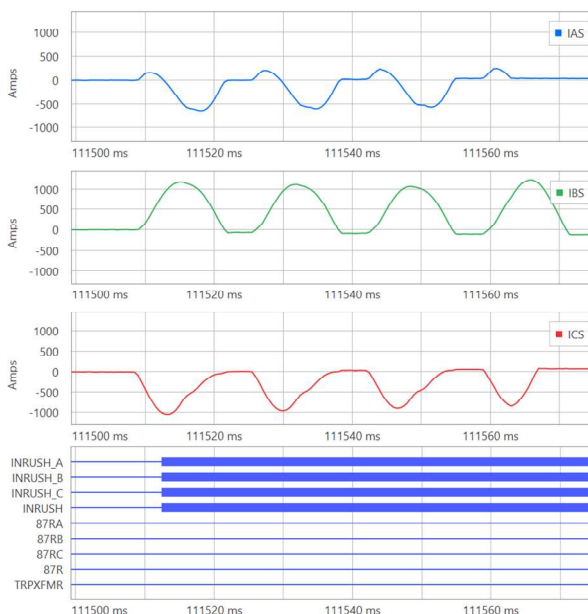


FIGURA 7 – Comportamento da nova lógica de detecção de *Inrush* para o Caso 2

6.0 - CONCLUSÕES

O trabalho revisou a origem da característica da corrente de *Inrush* e como a ultrasaturação do núcleo, fenômeno presente principalmente em novos transformadores devido as características dos projetos, faz com que a corrente de energização destes transformadores apresente baixo conteúdo harmônico, desafiando os elementos diferenciais tradicionais.

Foram apresentados dois casos reais de energização com baixo conteúdo harmônico com concessionárias de energia no Brasil que levaram a atuação indevida da função 87T e possíveis soluções para aumentar a segurança desta função foram discutidos. Todas as soluções discutidas aumentam a segurança, porém reduzem a velocidade ou confiabilidade da função 87T para faltas internas.

Foi revisado um novo método baseado no reconhecimento da forma de onda que usa os valores instantâneos das correntes de fase, bem como suas derivadas para identificação da condição de *Inrush*. Utilizando os eventos reais este novo método foi avaliado e mostrou-se seguro para detecção de *Inrush*, mantendo assim o bloqueio da função 87T. Apresentando-se, então, como uma melhor alternativa quando comparado com os elementos tradicionais de bloqueio e restrição por harmônicos.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Hodder, B. Kasztenny, III, N. Fischer and Y. Xia, "Low Second-Harmonic Content in Transformer Inrush Currents – Analysis and Practical Solutions for Protection Security", proceedings of the 67th Annual Conference for Protective Relays Engineers, College Station, TX, April 2014.
- (2) B. Kasztenny, M. Thompson, and N. Fischer, "Fundamentals of Short-Circuit Protection for Transformers," proceedings of the 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2010.
- (3) K. Behrendt, III, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays," proceedings of the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2006.
- (4) Manual de instruções do SEL-487E, disponível em: www.selinc.com

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Paulo Lima é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Itajubá em 2012 e especialista em Automação de Sistemas Elétricos pelo INATEL em 2015. Em 2013 ingressou na equipe de engenharia da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) como engenheiro de aplicação. Em 2018 passou a coordenar a equipe de Engenharia de Aplicação e Suporte Técnico da SEL Brasil e em 2020 assumiu a posição de Gerente Técnico da SEL Brasil. É instrutor da Universidade SEL e autor de diversos artigos técnicos nas áreas de transmissão, distribuição e geração de energia elétrica.

- (2) Douglas de Oliveira Brunismann possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná e atualmente está cursando Especialização em Automação de Sistemas Elétricos pelo Inatel. Possui mais de 8 anos de experiência em sistemas elétricos de potência e sistemas de proteção e controle. Ingressou na SEL em 2013 e atualmente integra a Engenharia de Aplicação da SEL.
- (3) Daniel Becker é Engenheiro Eletricista formado pela UFSM/RS. Atua há 16 anos na área de proteção da CEEE-T. Atualmente é o responsável pela Seção de Proteção e Medição.
- (4) Adilson Franco Kotryk nasceu em Curitiba em 20 de janeiro de 1977. Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (2010-2012). Especialista em Segurança do Trabalho – CEFET-PR (2001-2003). Engenheiro Eletricista Sênior na Copel Distribuição (2013-2020). Engenheiro Eletricista Pleno na Copel Transmissão (2002-2012)
- (5) Marcelo Alves Bettenga nasceu em Curitiba em 03 de maio de 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em eletrotécnica em 2005 pela Universidade Tecnológica federal do Paraná. Atualmente, atua como Engenheiro de Proteção da Copel Distribuição desde 2010.