

Modelagem, Simulação e Análise de Transitórios de Manobras para Definição de Supressores de Surto Como Proteção de Transformadores

Nelson C. Jesus, Joao R. Cogo
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
nelson@gsiconsultoria.com.br

Luiz M. Duarte, Luis F. R. Ferreira
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
gsi@gsiconsultoria.com.br

Resumo — Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise quanto à aplicação de supressores de surto na proteção de transformadores frente a eventos transitórios envolvendo manobras de chaveamentos de disjuntores. Apresentam-se os conceitos relacionados às sobretensões de manobra durante a operação de disjuntores a vácuo, os quais são amplamente utilizados em sistemas elétricos industriais. O sistema elétrico foi analisado para cada condição de operação, sendo modelado por meio do programa de Transitórios Eletromagnéticos - ATPDraw. Foram realizadas simulações de manobras de energização e desenergização, com e sem supressão das correntes (Chopping), analisando-se também eventos de altas frequências para definição do grau de proteção e configuração necessária a redução do impacto de sobretensões transitórias. Esta análise deve ser realizada em sistemas elétricos que possuam transformadores com meio isolante sólido (seco), especialmente com tensões de operação de 34,5 kV, sendo nestes casos fortemente recomendada a instalação de supressores de surto (RC) em conjunto com para-raios.

Palavras-chaves — Sobretensões de Manobra, Transitórios Eletromagnéticos, Disjuntores a Vácuo, Transformadores a Seco, ATPDraw, Supressores de Surto.

I. INTRODUÇÃO

Sobretensões de manobras associadas com disjuntores têm sido observadas por muitos anos. Atualmente, mais de 80% das novas instalações empregam disjuntores com meio de extinção do arco à vácuo [1]. Recentemente este fenômeno tem sido atribuído por um número significativo de falhas de transformadores envolvendo o chaveamento de disjuntores no lado primário. Estas falhas de transformadores apresentam parâmetros e características comuns, tais como os seguintes fatores: aplicação de disjuntores a vácuo ou SF6, cabos curtos ou conexão por barramentos ao transformador em aplicações envolvendo principalmente transformadores com meio isolante sólido (seco). No Brasil, entre 2012 a 2013, ocorreram diversas queimas consecutivas de transformadores, conforme relatado em [2]. Diante disso e, após estes fatos, tem sido recomendado realizar análises e simulações de transitórios eletromagnéticos envolvendo as manobras de disjuntores para definição e instalação de protetores de surto.

II. SOBRETENSÕES DE MANOBRA

De um modo geral diferentes tipos de sobretensões podem ocorrer em sistemas elétricos.

As manobras de chaveamento podem ser divididas como manobras de circuitos capacitivos (cabos, linhas aéreas, bancos de capacitores, filtros de harmônicos), indutivos (transformadores a vazio, motores, reatores, fornos a arco, sistema de tração elétrica, bobinas de supressão de arco “Peterson”) e circuitos controlados (geradores e inversores) [1]. Estas sobretensões também podem ser classificadas em função de sua forma de onda e duração. Neste caso, serão analisadas as sobretensões de manobras relacionadas aos chaveamentos de disjuntores à vácuo em circuitos indutivos, como no caso de manobras de transformadores a vazio. Os eventos transitórios podem ser ainda referenciados quanto às manobras de energização e desenergização, resultantes dos fenômenos de corrente de corte (“Chopping”), escalonamento da tensão devido a múltiplas reignições, correntes de corte induzidas (“Virtual Chopping Current”) e pré-ignições, resumidamente apresentadas a seguir.

III. MANOBRAS DE DISJUNTORES EM CIRCUITOS INDUTIVOS

A. Supressão de Corrente (Current Chopping)

Em um sistema ideal, os disjuntores interrompem a corrente exatamente na passagem pelo seu zero natural. Entretanto, quando uma corrente relativamente pequena for interrompida por um disjuntor, a ação dos dispositivos de supressão de arco pode fazer com que a corrente seja levada a zero abrupta e prematuramente antes de seu zero normal. Isto é denominado de corte de corrente (“current chopping”) e é uma forma de supressão da corrente que pode dar origem a sobretensões em virtude da energia magnética armazenada no circuito associado a corrente, conforme mostra a Fig. 1.

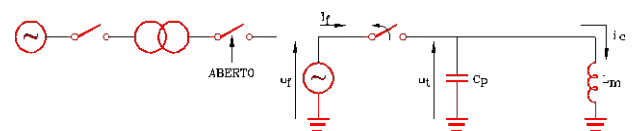


Fig. 1. Desenergização do Transformador a Vazio.

Isso pode ocorrer naturalmente quando a corrente de um reator ou transformador em vazio (corrente de magnetização) é interrompida. Neste caso, considere I_c o valor da corrente no instante do corte e assim, a energia magnética armazenada é equivalente a $(\frac{1}{2} \cdot L_m \cdot I_c^2)$. Esta energia é transferida como energia eletrostática na capacitância e equivale a $(\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot U^2)$.

Sendo assim, para o caso monofásico tem-se a seguinte tensão máxima resultante:

$$U_{\text{máx}} = Z_o \cdot I_o = \sqrt{\frac{LM}{C_p}} \cdot I_o \quad (1)$$

Portanto, a tensão de pico no capacitor, ou no enrolamento do transformador, é função do produto da corrente instantânea cortada pelo valor da impedância de surto do transformador (Z_o). Um fato notável é que $U_{\text{máx}}$ independe da tensão do sistema. A Fig. 2 mostra o conceito da corrente cortada e o respectivo efeito de sobretensões resultantes.

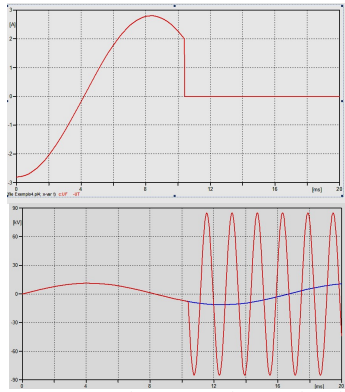


Fig. 2. Corte de Corrente e Sobretensões de Manobra de Desligamento.

B. Múltiplas Re-Ignições (Restrike)

Na realização de manobras de chaveamentos de pequenas correntes indutivas podem ser geradas sobretensões elevadas se ocorrer a reigitação do arco após a primeira interrupção da corrente e se o dispositivo de manobra for capaz de interromper correntes transitórias de altas frequências, as quais se estabelecem após as ocorrências de reigitações. Este processo sempre inclui uma relação transitória entre as capacitâncias do sistema e do lado da carga. Se este processo ocorrer repetidamente, será definido como múltiplas reigitações. As amplitudes tendem a aumentar a cada reigitação, com um escalonamento de tensão, com severas sobretensões e risco a operação e equipamentos do sistema. A Fig. 3 mostra um exemplo da característica dielétrica de disjuntores e a ocorrência de múltiplas reigitações [3].

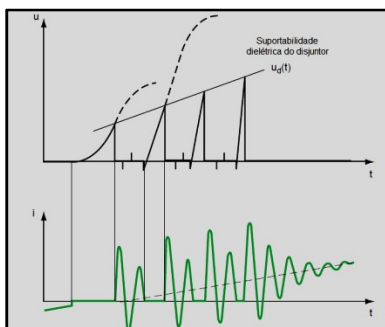


Fig. 3. Ocorrência de Múltiplas Reigitações.

C. Corte de Correntes Induzidas (Virtual Current Chopping)

Este fenômeno pode ocorrer durante o processo de interrupção de dispositivos de manobra devido à dispersão entre os pólos do sistema trifásico. Este tipo de evento é fortemente dependente dos parâmetros do sistema e mais raro que os demais eventos apresentados anteriormente [1]. Durante uma abertura com aumento das amplitudes das

tensões, causada por re-ignições, tem-se como resultado sobrecorrentes de altas frequências. Se este transitório de corrente estiver acoplado por meio magnético ou eletrostático, devido às indutâncias e capacitâncias do sistema, têm-se os cortes de correntes induzidas nas demais fases. Após a interrupção do primeiro pólo do disjuntor as correntes nas demais fases, as quais ainda conduzem as componentes da frequência fundamental, passam a conter também em sua forma de onda, correntes transitórias superpostas. Se o disjuntor interromper uma dessas componentes de altas frequências, estas serão então denominadas de “Virtual Currents Chopping”. A interrupção dessas correntes com a carga ainda conduzindo a corrente na frequência fundamental tem similaridade ao mesmo efeito da supressão da corrente de carga. Em função deste conceito e devido à mesma fórmula de cálculo, a tensão máxima e a frequência serão função dos parâmetros L e C do circuito. Entretanto, comparado com o fenômeno da corrente cortada, os cortes das correntes induzidas poderão ser maiores. A Fig. 5 ilustra o conceito deste tipo de fenômeno.

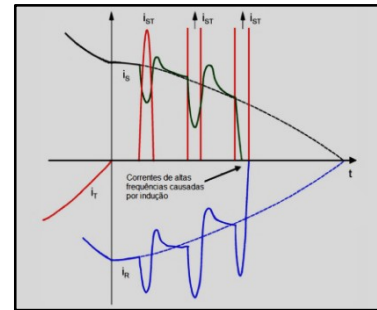


Fig. 4. Corte de Correntes Induzidas.

As ações das interrupções das correntes de altas frequências, característica típica de disjuntores a vácuo, pode gerar severas sobretensões no sistema. De um modo geral, para este tipo de efeito, as sobretensões no sistema podem ser reduzidas e limitadas pela instalação de para-raios.

D. Múltiplas Pré-ignições (Pré-strike)

Os eventos descritos anteriormente estavam relacionados diretamente as sobretensões durante manobras de desligamentos. Diferentemente dos demais, este item aborda as sobretensões para manobras de energização. Quando da manobra de fechamento dos pólos do disjuntor, o circuito este quase por completo antes do toque mecânico entre os seus contatos. A tensão imposta pelo sistema força a redução do “gap”, criando um aumento do “stress” dielétrico entre os contatos. Se a tensão entre seus pólos superar a característica fria do disjuntor, conforme mostra a Fig. 5, pré-ignições serão estabelecidas, podendo resultar em sobretensões repetitivas de altas frequências [3].

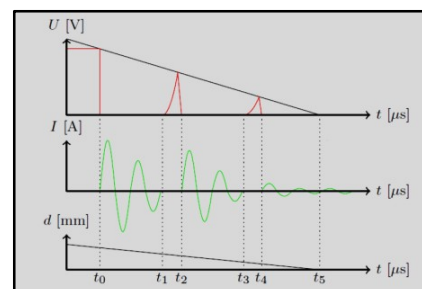


Fig. 5. Ocorrência de Múltiplas Pré-ignições.

IV. SIMULAÇÃO DE MANOBRAS DE CHAVEAMENTOS

Este item descreve as simulações das manobras de chaveamentos envolvendo a energização e desenergização do disjuntor associado ao transformador TR1 em análise, com potência nominal de 3 MVA em 34,5 kV. A modelagem do sistema foi realizada através do programa de transitórios eletromagnéticos ATPDraw. Para tanto, foram representados os dados desde a entrada do sistema em 34,5 kV até o ponto de conexão do transformador. Além disso, considerou um modelo de disjuntor específico para simulações de pré-ignições (“pre-strike”) e re-ignições (“re-strike”), de modo a avaliar o efeito e desempenho do sistema durante manobras de disjuntores a vácuo. Os seguintes casos foram adotados nas simulações:

A. Manobra de Energização

A Fig. 6 mostra o diagrama adotado para a simulação das manobras do transformador para o sistema atual, considerando as impedâncias equivalentes de curto-circuito e os cabos existentes no sistema elétrico em análise.

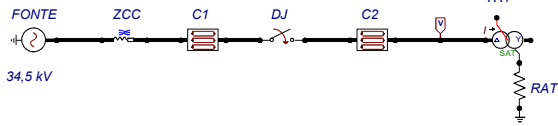


Fig. 6. Modelagem do Sistema para Manobras de Energização e Desenergização.

A Fig. 7 apresenta as formas de onda das correntes transitórias de energização, resultando em um valor máximo de 461 A, ou seja, aproximadamente 6,5 vezes o valor de pico nominal, observando-se também o efeito das reflexões nos cabos do sistema, para os instantes anteriores ao estabelecimento das correntes de magnetização do transformador (correntes de “inrush”). As tensões fase-terra obtidas nos terminais do transformador durante esta simulação podem ser verificadas na Fig. 8 a seguir.

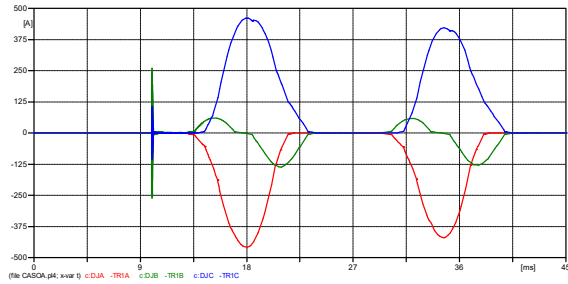


Fig. 7. Correntes Transitórias de Energização do Transformador.

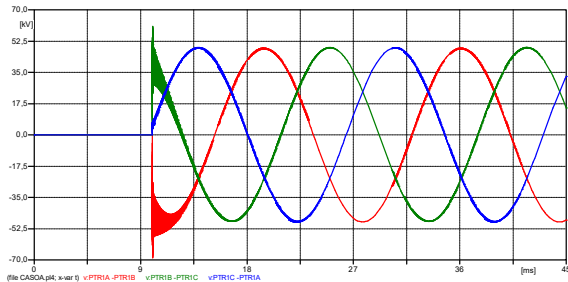


Fig. 8. Tensões Transitórias de Energização do Transformador.

O valor máximo da sobretensão fase-terra obtido na simulação foi de 43,20 kV, que corresponde a 1,53 pu em relação ao valor de pico nominal. As oscilações verificadas nas tensões do sistema a vazio estão relacionadas às reflexões em função das impedâncias do sistema e dos cabos isolados, conforme mostrado na Fig. 9.

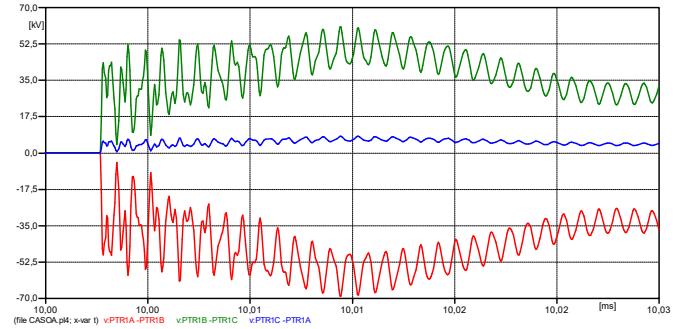


Fig. 9. Detalhes das Tensões Transitórias de Energização do Transformador.

B. Manobra de Desenergização

Este caso mostra os resultados da manobra de desligamento do transformador, sem considerar um valor para a corrente de corte (“Chopping”), ou seja, considerando a interrupção da corrente em seu zero natural. Conforme mostram os resultados obtidos, para estas condições não ocorreram sobretensões na simulação desta manobra.

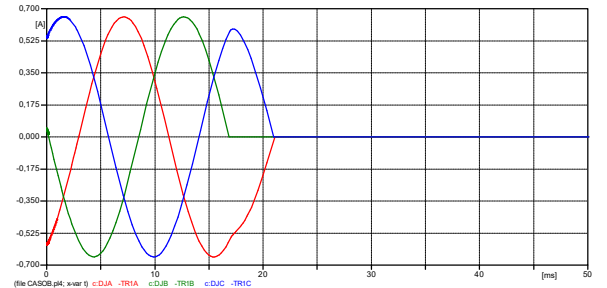


Fig. 10. Correntes de Desenergização com Interrupção no Zero Natural.

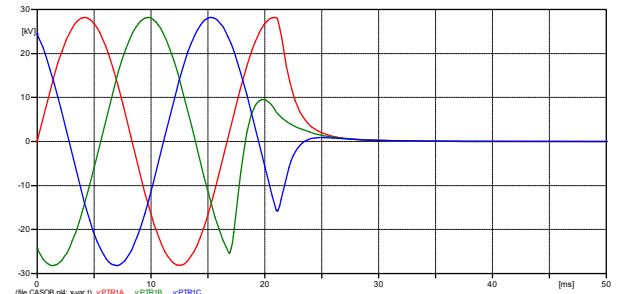


Fig. 11. Tensões Transitórias de Desenergização do Transformador.

C. Manobra de Desenergização com Corte de Corrente

Os casos a seguir contemplam a interrupção das correntes com o transformador a vazio, considerando a corrente de corte (“chopping”), ou seja, com supressão da corrente próxima ao seu valor instantâneo de pico. Para esta condição (C1), foi inicialmente avaliado um caso teórico, referente à pior condição, pois o transformador foi representado apenas com a sua reatância de magnetização (XM), de acordo com a respectiva curva de saturação. Nesta condição a interrupção da corrente foi em 0,59 A, como ilustra a Fig. 12.

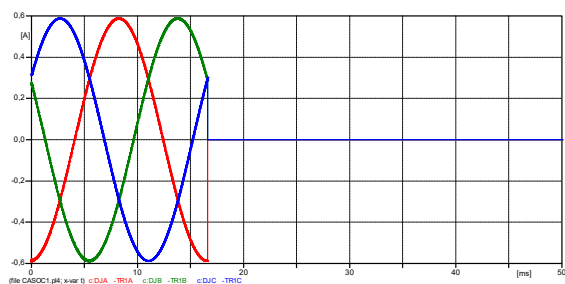


Fig. 12. Correntes de Desenergização com Supressão de Corrente Desconsiderando as Perdas a Vazio.

Portanto, a manobra anterior visou avaliar as máximas sobretensões transitórias, considerando a desenergização e o modelo simplificado do transformador. Observa-se na Fig. 13 sobretensões resultantes da oscilação do sistema na frequência de 300 Hz. A máxima sobretensão de linha observada nesta manobra, desconsiderando as perdas vazio do transformador, foi de 181,7 kV, ou seja, 3,72 pu.

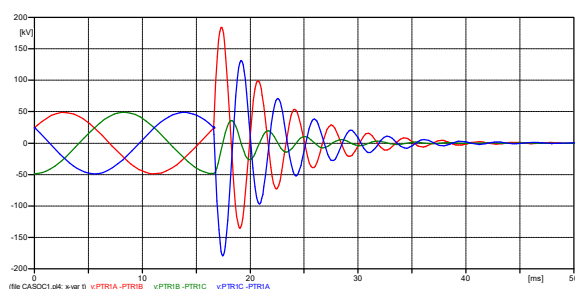


Fig. 13. Tensões Transitórias de Desenergização com Supressão de Corrente Desconsiderando as Perdas a Vazio.

Adicionalmente, este caso foi repetido, exceto que o transformador foi representado com as suas perdas a vazio, onde tem-se o ramo magnetizante formado pela reatância de magnetização (XM) em paralelo com a resistência de magnetização (RM). Nesta condição (C2), a interrupção da corrente foi realizada considerando um valor de pico de aproximadamente 0,65 A, sem a presença de sobretensões significativas e rápido amortecimento, conforme pode ser verificado na Fig. 14.

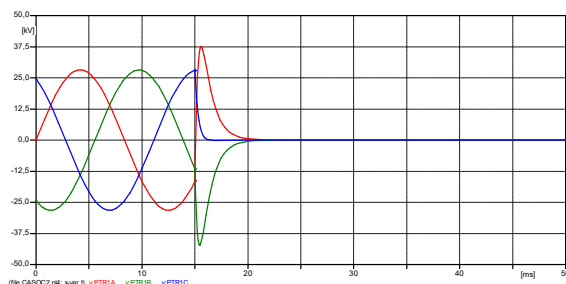


Fig. 14. Tensões Transitórias de Desenergização com Supressão de Corrente Considerando as Perdas a Vazio.

D. Manobra de Energização do Transformador Com Pré-Iguições ("Pre-Strike")

Este item apresenta os resultados das manobras de energização do transformador considerando a ocorrência de pré-ignições. O circuito adotado como base para as manobras considerando o efeito de Pré-Iguições e Re-ignições está ilustrado na Fig. 15 a seguir, onde foram representados os modelos com as características dielétricas do disjuntor e as capacitâncias parasitas equivalentes.

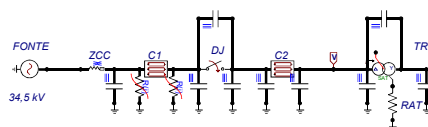


Fig. 15. Modelagem do Sistema para Manobras de Energização e Desenergização Considerando as Ocorrências de Pré-Iguições e Re-Iguições.

A Fig. 16 mostra as correntes transitórias durante a manobra de energização com a ocorrência de pré-ignições.

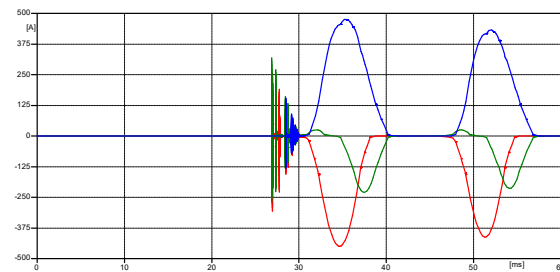


Fig. 16. Correntes Transitórias de Energização do Transformador.

O valor máximo encontrado para as tensões de fase foi de 47,37 kV, que equivale aproximadamente 1,62 pu em relação ao respectivo valor nominal de pico, conforme mostrado na Fig. 17. Entretanto, nota-se a presença de variações repetitivas e de altas frequências.

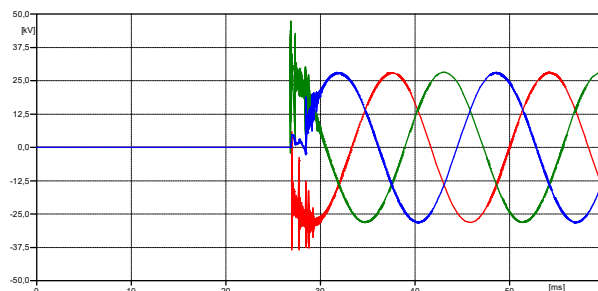


Fig. 17. Tensões Transitórias de Energização com Pré-Iguições.

E. Manobra de Desenergização do Transformado Com Re-Iguições (Re-strike)

A Fig. 18 mostra as correntes transitórias durante a manobra de desenergização, com a ocorrência de re-ignições, enquanto as respectivas tensões de fase nos terminais do transformador estão apresentadas na Fig 19.

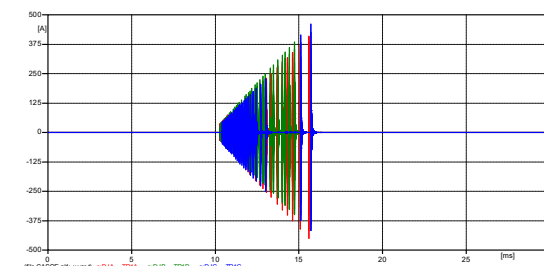


Fig. 18. Correntes Transitórias de Desenergização do Transformador.

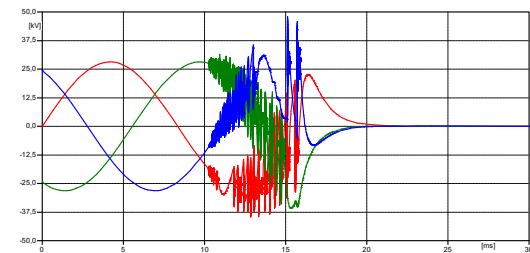


Fig. 19. Tensões Transitórias de Desenergização com Re-Iguições.

Em função das ocorrências de sobretensões transitórias de altas frequências para os casos analisados anteriormente e o risco iminente de impacto no sistema de isolamento do transformador, foram incluídos elementos com o objetivo de atenuar as sobretensões e assim proteger o transformador contra sobretensões de manobra. Para a proteção de equipamentos em sistemas elétricos que apresentem riscos de ocorrências de sobretensões devido aos transitórios de manobras, basicamente podem ser utilizados para-raios, indutores de bloqueio, capacitores de surto e supressores de surto. Para-raios tem a função de limitar o valor de pico e são eficazes na maioria das aplicações, exceto onde as taxas de elevação das sobretensões (dv/dt) e a excitação de oscilações ressonantes não são críticas ou não ocorrem. Já os capacitores de surto, amplamente empregados em conjunto com para-raios em motores e geradores de grande porte, reduzem as taxas de elevação das sobretensões devido ao aumento da capacitância fase-terra, sendo especialmente aplicados e eficazes para manobras de desligamentos. Para chaveamentos em circuitos indutivos, onde múltiplas pre-ignições ou re-ignições podem ocorrer, capacitores puros são considerados não favoráveis. Supressores de surto constituídos por circuitos RC formam um caminho de baixa impedância para correntes de altas frequências, desviando os transitórios para a terra. Deste modo, amortecem ondas viajantes e previnem sua refração nos cabos que alimentam a carga, reduzindo as solicitações de impulsos repetitivos no sistema de isolamento e possíveis excitações de ressonâncias nos enrolamentos do transformador em caso de múltiplas ignições ou reignições. Além destes, existem indutores de bloqueio e equipamentos em que os para-raios estão em paralelo com o resistor e não com o conjunto RC do supressor, para tensões inferiores a 34,5 [kV]. Os capacitores normalmente utilizados possuem faixa entre 0,1 a 0,3 μF . Para a definição do resistor (R) do supressor de surto na proteção de transformadores ou motores, em função da impedância de surto (Z_C) dos cabos que alimentam o equipamento a ser protegido, normalmente recomenda-se a seguinte faixa:

$$Z_C \leq R \leq 3 Z_C \quad (2)$$

F. Manobras de Energização do Transformador Com Pré-Ignições e Inclusão de Capacitores de Surto e Para-raios

A Fig. 20 mostra o circuito adotado como base para as manobras de energização e desenergização, considerando transitórios devido aos disjuntores a vácuo, bem como a inclusão de para-raios em conjunto com capacitores de surto.

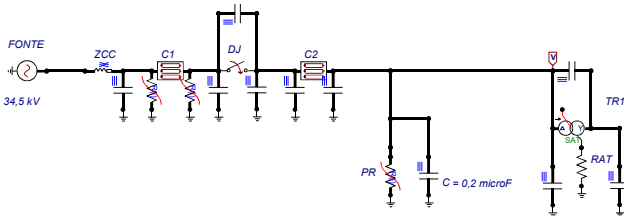


Fig. 20. Modelagem do Sistema para Manobras de Energização e Desenergização Considerando as Ocorrências de Pré-Ignições e Re-Ignições e Inclusão de Capacitores de Surto e Para-Raios.

A Fig. 21 mostra as correntes transitórias durante a manobra de energização para este caso, enquanto a Fig. 22 ilustra as tensões nos terminais do transformador.

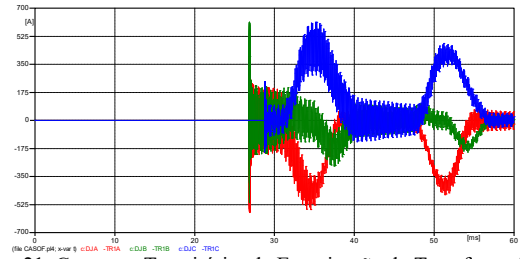


Fig. 21. Correntes Transitórias de Energização do Transformador.

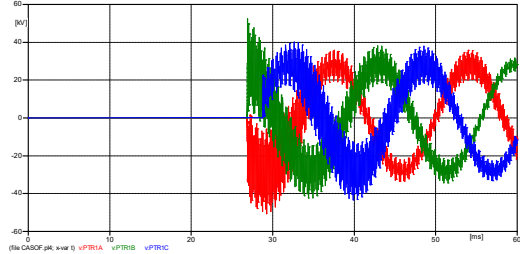


Fig. 22. Tensões Transitórias de Energização do Transformador.

G. Manobra de Desenergização do Transformador Com Re-Ignições (Re-strike) e Inclusão de Capacitores de Surto e Para-raios

Os resultados a seguir mostram as correntes durante a manobra de desligamento do disjuntor e o amortecimento das tensões, com a inclusão dos capacitores de surto no sistema.

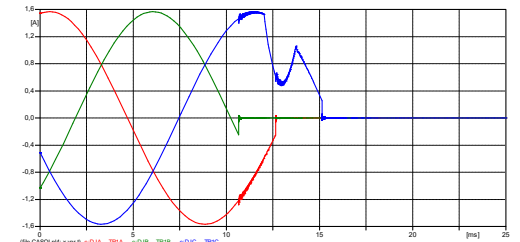


Fig. 23. Correntes de Desenergização do Transformador.

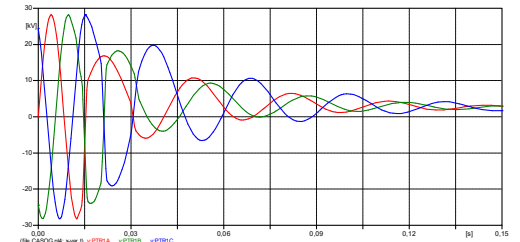


Fig. 24. Tensões Transitórias de Desenergização do Transformador.

H. Manobra de Energização do Transformador Com Pré-Ignições (Pre-Strike) e Inclusão de Supressores de Surto e Para-raios

A Fig. 25 mostra o circuito adotado como base para as manobras de energização e desenergização, considerando transitórios devido aos disjuntores a vácuo, bem como a inclusão de para-raios em conjunto com supressores de surto.

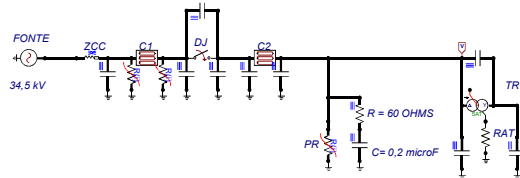


Fig. 25. Modelagem do Sistema para Manobras de Energização e Desenergização Considerando as Ocorrências de Pré-Ignições e Re-Ignições e Inclusão de Supressores de Surto e Para-Raios.

A Fig. 26 mostra as correntes obtidas na condição de manobra do disjuntor na energização do transformador com a inclusão dos supressores de surto. As respectivas tensões estão apresentadas na Fig. 27 e seu detalhamento na Fig. 28.

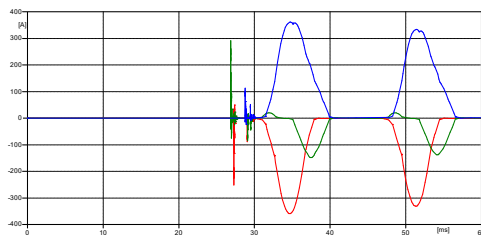


Fig. 26. Correntes Transitórias de Energização do Transformador.

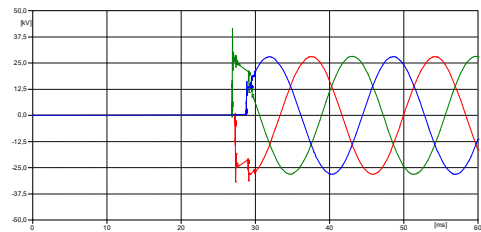


Fig. 27. Tensões Transitórias de Energização do Transformador.

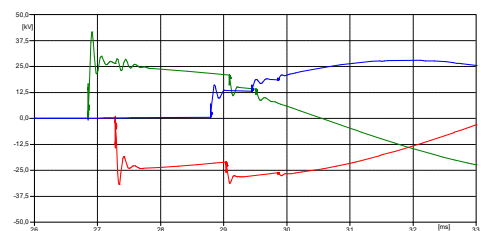


Fig. 28. Detalhe das Tensões Transitórias de Energização do Transformador.

I. Manobra de Desenergização do Transformador Com Re-Ignições (Re-Strike) e Inclusão de Supressores de Surto e Para-raios

Os resultados a seguir mostram as correntes durante a manobra de desligamento do disjuntor e o amortecimento das tensões, com a inclusão dos supressores de surto no sistema, assim como verificado no caso de capacitores de surto.

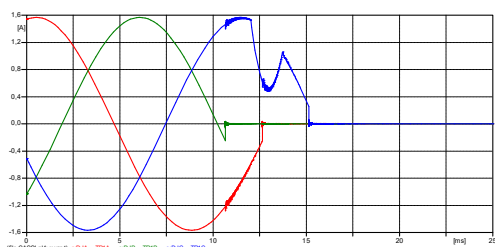


Fig. 29. Correntes de Desenergização do Transformador.

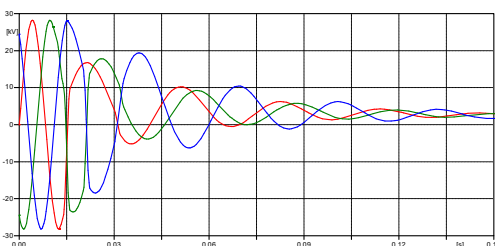


Fig. 30. Tensões Transitórias de Desenergização do Transformador.

A Tabela I a seguir mostra um resumo dos resultados, com os valores das correntes, tensões e frequências predominantes para os transitórios dos casos de manobras avaliados.

TABELA I. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANOBRAS DE CHAVEAMENTO.

Manobras			Imáx [A]	Umáx [kV]	F [kHz]	
Caso	Tipo	Proteção	Inrush	Pré ou Restrike	F-F	F-T
A	E	-	461	-	43,20	68,80
B	D	-	0,65	-	28,20	48,79
C1	DC	-	0,59	-	120,3	181,70
C2	DC	-	0,65	-	42,27	79,36
D	E (PRE)	-	480	318	47,37	69,47
E	D (RE)	-	0,65	461	48,03	80,94
F	E (PRE)	CS E PR	613	612	52,42	85,36
G	D (RE)	CS E PR	1,61	-	28,17	50,64
H	E (PRE)	RC E PR	361	289	41,51	58,07
I	D (RE)	RC E PR	0,65	-	28,17	50,39

Nota: Considera-se manobras de energizações (E), desenergizações (D), cortes de corrente (DC), múltiplas reconduções para os casos de pré-ignições (PRE) e re-ignições (RE), bem como casos sem e com capacitores de surto (CS) e supressores de surto (RC), em conjunto com para-raios (PR), conectados junto aos terminais do transformador durante as simulações.

V. CONCLUSÕES

O caso sem equipamentos de proteção e sem perdas resultou na maior sobretensão durante a manobra de abertura com supressão da corrente. Entretanto, a inclusão das perdas a vazio do transformador colaborou ao amortecimento das sobretensões. Para eventos de múltiplas reconduções verificam-se a ocorrência de sobretensões de curtíssima duração repetitivas (*Very Fast Transient Overvoltage*). Observou-se ainda que para manobras de desenergizações, o capacitor de surto e o supressor de surto (RC) apresentam desempenhos semelhantes com o amortecimento das sobretensões. Entretanto, para eventos de pré-ignições, o capacitor de surto apresentou desempenho inferior ao supressor composto por um circuito RC. De um modo geral, destaca-se que os para-raios protegem o equipamento somente frente às altas intensidades, mas não o protegem contra outras sobretensões de manobras. A utilização de capacitor de surto e para-raios reduz a taxa de elevação das sobretensões e se mostrou mais eficaz durante as manobras de desenergização com re-ignições. Já os supressores de surto (RC) em conjunto com para-raios também reduzem as taxas de crescimento das tensões, assimetrias (DC offset) e fornecem amortecimento, sendo esta configuração a recomendada para instalações nas mesmas condições desta análise. Finalmente, salienta-se que o tema abordado neste trabalho é de grande relevância ao setor industrial e, sendo assim, pesquisas para estudos correlacionados a estes tipos de eventos devem ser propostas e desenvolvidas.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] A. Mueller; D. Saemann, "Switching Phenomena in Medium Voltage Systems - Good Engineering Practice on the Application of Vacuum Circuit-Breakers and Contactors", PCIC EUROPE - Petroleum and Chemical Industry Europe Conference Proceedings, 2011.
- [2] N. C. Jesus; J. R. Cogo, L.M. Duarte; L.F.R. Ferreira, et al, "Medições de Manobras de Energização de Transformadores Considerando a Instalação de Supressores de Surto", XI CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Campina Grande (PA), 2015.
- [3] J. Glasdam; C.L. Bak; J. Hjerrild, "Transient Studies in Large Offshore Wind Farms Employing Detailed Circuit Breaker Representation", Energy, 2012.