

Modelagem, Análise e Simulações de Casos Envolvendo Ocorrências do Fenômeno de Ferrorressonância em Sistemas Elétricos

Nelson Clodoaldo de Jesus
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
nelson@gsiconsultoria.com.br

Benedito Donizeti Bonatto
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
Itajubá (MG), Brasil
bonatto@unifei.edu.br

Ezi Adjoio Indi
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
Itajubá (MG), Brasil
d2022102717@unifei.edu.br

Adriano Garufe Nogueira
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
adriano.nogueira@gsiconsultoria.com.br

João Roberto Cogo
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
gsi@gsiconsultoria.com.br

Danilo Machado Oliveira
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
Itajubá (MG), Brasil
danilo.machado3@hotmail.com

Resumo - Este trabalho apresenta uma análise do fenômeno da ferrorressonância em sistemas elétricos, considerando os principais aspectos envolvidos com a ocorrência, a partir da modelagem e simulação de casos de transitórios eletromagnéticos, utilizando-se o programa ATPDraw. Serão apresentados resultados de simulações de um caso clássico de ferrorressonância, bem como de uma análise do fenômeno para um sistema elétrico de distribuição, considerando a influência das tensões de operação do sistema e do comprimento de cabos.

Palavras chave – Modelagem, Simulações, Transitórios Eletromagnéticos, Ferrorressonância, ATPDraw.

I. INTRODUÇÃO

Nos casos de ressonâncias em circuitos RLC com indutâncias constantes (independente da corrente), a ressonância ocorre quando os efeitos indutivo e capacitivo se equivalem, fazendo com que as correntes e tensões assumam valores muito elevados. Quando a indutância presente no sistema elétrico não é constante, ou seja, quando os indutores existentes possuem núcleos de ferro, não acontece mais a ressonância propriamente dita. Ocorre, portanto, a denominada Ferrorressonância, ou seja, um fenômeno correspondente à ressonância, mas com indutores que apresentam o efeito da saturação [1], [2], [3].

A resposta do sistema pode subitamente se alterar de uma condição normal para um outro ponto de operação, caracterizado muitas vezes, por elevadas sobretensões e distorções, as quais podem levar a excessivos aquecimentos e falhas de isolamento de transformadores e demais equipamentos instalados.

A ferrorressonância refere-se a um fenômeno oscilatório não linear, complexo e de alta imprevisibilidade que pode surgir em circuitos ressonantes com capacitâncias, juntamente com indutâncias não lineares.

Os primeiros trabalhos publicados sobre o tema datam do início do século XX e ocorrem até os dias atuais [4], [5], [6], [7], [9]. Em geral, após eventos de comutação (faltas, ação da proteção, comandos de chaveamento etc.), podem ocorrer sobretensões transitórias, conduzindo o sistema a uma condição de ferrorressonância.

Devido à não linearidade desse fenômeno, podem existir quatro tipos de respostas em estado estacionário, que são: fundamental, sub harmônico, quase periódico e caótico [3].

II. FERRORRESSONÂNCIA EM CIRCUITOS SIMPLES

Basicamente a Ferrorressonância em circuitos simples, pode ser obtida como ilustrado na Fig. 1, onde tem-se uma fonte ideal de tensão senoidal (U) que alimenta um circuito formado por uma capacitância constante C , em série com uma bobina de indutância L com núcleo de ferro. Em todo instante, a tensão de alimentação deve equilibrar as tensões na indutância L e capacitância C [2]. Na análise a seguir, serão desprezados todos os efeitos relativos às resistências elétricas (R) e das perdas por Histerese e Foucault, para que, nesse momento, o efeito da saturação do ferro não seja influenciado pelas respectivas resistências.

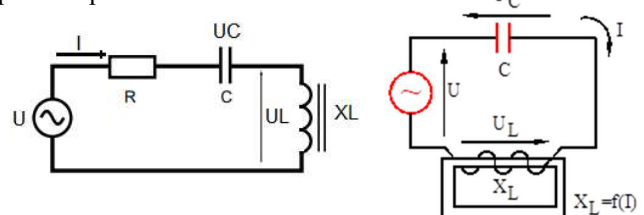


Fig. 1 Circuito básico correspondente à análise da Ferrorressonância.

Considerando apenas os componentes fundamentais das ondas de tensão e corrente, pode-se obter o diagrama fasorial apresentado na Fig. 2.

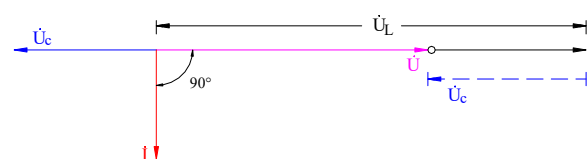


Fig. 2 Diagrama fasorial para o circuito da Fig. 1

Em módulo, pode-se escrever:

$$U_L = U + U_C \quad (1)$$

Como $U_C = X_C \cdot I$ e, visto que L varia com a corrente (considera-se $U_L = \omega \cdot f(I)$, sendo $f(I)$ uma função da corrente, para levar em conta a saturação), nota-se a possibilidade do aumento da tensão como mostra a Fig. 2, visto que a solução do problema apresentado na Fig. 1 indica que U_L sempre deve ser igual à soma da tensão da fonte com a tensão nos terminais do capacitor.

Considerando as relações básicas das reatâncias indutivas e capacitivas em função das frequências $X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ e $X_C = 1/(\omega \cdot C) = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$, pode-se relacionar a tensão do indutor ($U_L = X_L \cdot I$) com a frequência, como mostra a Equação (2) e a própria característica ilustrada na Fig. 2.

$$U_L = \omega \cdot f(I) = U + \frac{I}{\omega \cdot C} \quad (2)$$

Pode-se, então, partir para uma solução gráfica do problema apresentado na Fig. 1. A equação (2) também indica que U_L sempre deve ser igual à soma da tensão da fonte, com módulo constante, e a tensão que pode ser dada em função da corrente. Na Fig. 3, registra-se a tensão em função da corrente. U é representada por uma reta horizontal que está superposta à U_C , uma reta crescente e inclinada com o ângulo γ , dado por:

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{I}{\omega C} \right) \quad (3)$$

Portanto, I_L é a corrente de carga de C como se não existisse indutância no circuito. I_L é negativa porque a corrente é capacitiva, sendo contrária portanto à mostrada no diagrama fasorial. Por outro lado, I_μ é a corrente de magnetização no indutor como se não houvesse C no circuito. A equação (2) só é obedecida no ponto A da Fig. 3. Enquanto a tensão do sistema conectada apenas a L produziria uma pequena corrente de magnetização I_μ , e conectada apenas a C produziria a considerável corrente de carga I_L . Sob a ação conjunta de ambos os elementos, tem-se a corrente I (módulo de $\vec{I}$), que está entre aqueles dois valores. Simultaneamente, ocorre um aumento em U_L , em relação a U , dado pelo ponto de interseção entre as curvas de U_C e U_L . Reduzindo-se a capacitância, a tensão U_L aumentará.

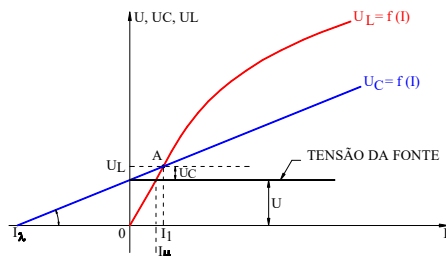


Fig. 3. Solução gráfica para o circuito apresentado na Fig. 1.

O comportamento do ponto de operação (A), mantendo inalteradas as características da bobina (número de espiras e relutâncias) mas variando-se C , como ilustra a Fig. 4.

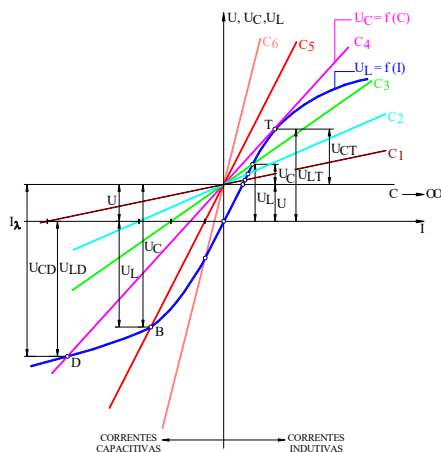


Fig. 4. Comportamento do ponto de operação com a variação de C e mantendo-se L constante.

Na Fig. 4, observa-se que:

- Uma capacitância C com valor bastante elevado, resulta também naturalmente em uma corrente I também elevada, ou seja, age como um curto-circuito, já que, nesse caso, $U = U_L$;
 - O decréscimo de C desloca o ponto de operação de modo a que detenham valores ainda mais altos de U_L
 - Há uma limitação para o decréscimo de C , por causa da curvatura da característica do ferro (ponto T).
- Para valores ainda menores de C , a operação não será mais possível no 1º quadrante;
- A característica de U_C , contudo, intercepta a curva de saturação no 3º quadrante, ou seja, para valores negativos de tensão e corrente. Nestas circunstâncias, a corrente passou de magnetizante para corrente de carga adiantada, e a magnitude desta corrente aumenta consideravelmente para interseções mais à esquerda;
 - A Fig. 5 mostra que, quando a operação passa para o 3º quadrante, as tensões aumentam substancialmente, e assim poderão ocorrer severas sobretensões no circuito;
 - Quando C diminui além do valor que corresponde ao ponto B, U_L e U_C também diminuem. Para capacitâncias muito pequenas, $U_L \rightarrow 0$ e $U_C = U$.

Conclui-se que, ao contrário da ressonância em circuitos com L constante, quando se tem indutor de núcleo saturável, não se desenvolvem ferrossonâncias em que a tensão aumente sem limites. Pelo contrário, as tensões serão finitas para quaisquer valores de C . Entretanto, por causa do efeito da saturação, desenvolve-se um ponto de descontinuidade, no qual, com qualquer decréscimo adicional de C , a tensão passará de um valor pequeno (ponto T) para um valor grande (ponto B); conforme ilustra a Fig. 4. Neste ponto, o estado de oscilação do circuito e a fase de I em relação a U variam bruscamente e podem dar origem a sobretensões, embora não no sentido próprio de ressonância. Nota-se, ainda na Fig. 4, que, mesmo para grandes valores de capacitância, as linhas que representam a tensão $U_C = f(C)$ ainda interceptam o eixo de correntes no lado negativo. Sendo assim, há dois diferentes estados de oscilações possíveis: um deles de baixa tensão e corrente atrasada, e o outro de alta tensão e corrente adiantada. Estes casos são representados na Fig. 5 por traços contínuos. Qual dos dois estados ocorrerá, depende da fase de tensão no instante do chaveamento. Nota-se, ainda na Fig. 4 que, no caso de pequenas tensões e correntes no primeiro quadrante, a tensão na bobina é maior que no capacitor, ao passo que no terceiro quadrante o inverso é verdadeiro.

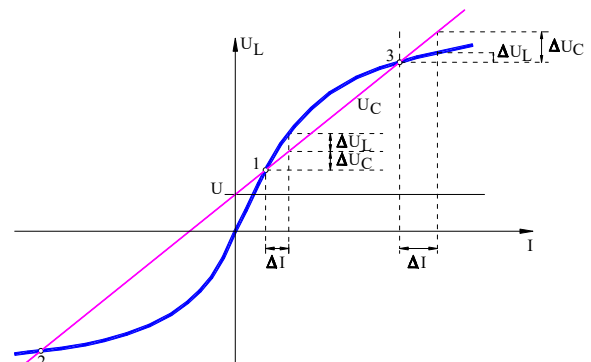


Fig. 5. Pontos possíveis de operação.

Um terceiro ponto de operação pode ocorrer conforme mostrado pelo ponto 3 da Fig. 5. Os pontos 1 e 2 representam operação estável ao passo que o ponto 3 representa operação instável. Para o ponto 1, tem-se a operação estável na região linear e com reduzida probabilidade de ocorrência de ferorrressonância. Para o ponto 2, na região de saturação, tem-se também uma condição estável, pois qualquer variação incremental da corrente, causará mudanças nas tensões indutivas e capacitivas, tendendo a levar a corrente a retornar ao seu valor inicial. Finalmente, para o ponto 3, o mesmo comportamento estável não ocorre, tem-se um ponto instável [1], [16], pois uma variação momentânea causaria mudança significativas nas tensões, tal que não levará a corrente a retornar ao seu valor inicial, contrariando o princípio físico.

III. FERORRESSONÂNCIAS CAUSADAS POR MANOBRAS OU INTERRUPTÕES MONOPOLARES

Ferorrressonância em sistemas trifásicos podem envolver grandes transformadores, transformadores de distribuição ou transformadores de instrumentos (TP's). Os requisitos gerais para ocorrência de ferorrressonância são uma fonte de tensão aplicada (ou induzida), uma indutância de magnetização do transformador (saturável), uma capacitância e pequeno amortecimento do sistema [5].

A capacitância pode ser na forma de capacitância de cabos subterrâneos ou longas linhas de transmissão, bancos de capacitores, acoplamento capacitivo entre linhas de circuitos duplos ou sistemas temporariamente isolados, capacitância de sequência zero em sistemas de distribuição e capacit disjuntores em extra-alta tensão. Os distúrbios que iniciar a ocorrência da ferorrressonância são chave monopolares ou atuação de elos-fusíveis, além de 1 sistema de aterramento.

As configurações mais usuais em sistemas de dist durante manobras monopolares que podem resu sobretensões ferorrressonantes são dadas na Fig. 6, ir determinados caminhos que podem propiciar a sua oc tais como a ruptura de um cabo, chaveamento monop atuação de elos-fusíveis, como exemplos práticos [3]

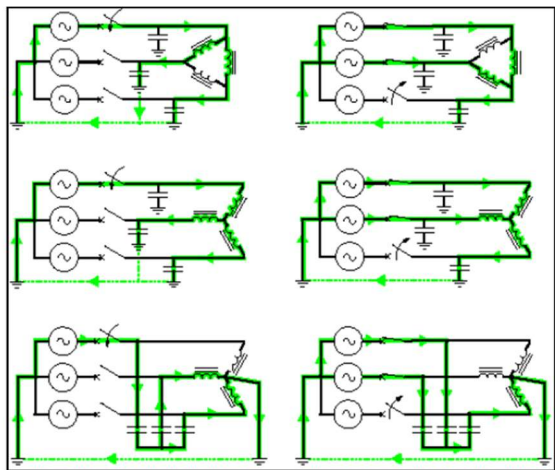


Fig. 6. Configurações típicas de ocorrência de ferorrressonância.

Conforme estudo em um sistema de distribuição rural, foram reportados casos envolvendo ferorrressonâncias na análise de um sistema de 23 kV, em seu período fora de safra, após atuações da proteção e condição desequilibrada.

A título de exemplo de um caso real, a Fig. 7 ilustra os resultados de medições de sistema com ferorrressonância [8].

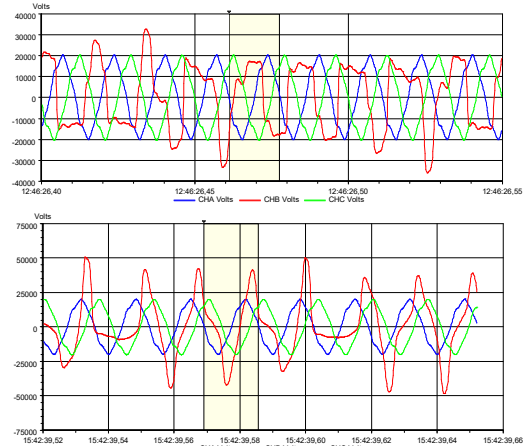


Fig. 7. Exemplos de medição de ocorrências de ferorrressonância.

IV. SIMULAÇÃO DE CASOS DE FERORRESSONÂNCIAS

A. Caso Exemplo de Análise Comparativa

Este item apresenta um caso de ferorrressonância que refere-se à modelagem de um sistema elétrico em 1100 kV, utilizado para análise comparativa dos resultados. A Fig. 8 mostra o sistema elétrico envolvendo a operação de um autotransformador e uma linha de transmissão. Com base no circuito apresentado, deve-se considerar que apenas a fase B do sistema se encontrava energizada [9].

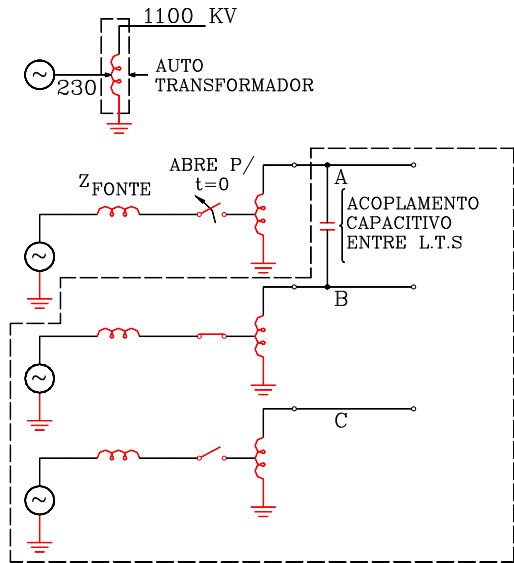


Fig. 8. Sistema elétrico de 1100 kV para análise de ferorrressonância.

Conforme descrito na referência do Prof. H.W. Dommel, os dados do sistema elétrico são apresentados a seguir [9]:

Tensão da Fonte UF.....	230 kV
freqüência (f).....	60 Hz
Impedância de sequência positiva Z+.....	7,04 Ω
Impedância de sequência zero Z0	7,88 Ω
Autotransformador:	
Relação de transformação	230/1100 kV
Potência Nominal SN.....	50 MVA
Impedância percentual Z%.....	18,4 %
Perdas	189,966 kW
Resistência de Magnetização Rm	4,49 MΩ

A Tabela I mostra a curva de saturação não-linear associada a reatância X_M , conforme [9], utilizada na simulação do sistema equivalente da Fig. 8.

TABELA I - Dados adotados para a curva de saturação

I (A)	Fluxo (Wb)
0,6	2100
2,7	2700
6,0	2900

As resistências e reatâncias de dispersão do transformador foram divididas em duas partes (R_{21} , R_{22} , X_{21} e X_{22}), inseridas entre o ramo magnetizante, cada qual com 50% do valor referido ao lado de 1100 kV. Para a análise do sistema, foram adotados os seguintes parâmetros:

Tempo de Simulação.....150 ms
 Passo de integração (Δt) 1 μ s
 Tempo de abertura da chave SW1.....0 s
 Distância da LT em 1100 kV 2,09 km

A linha de transmissão foi representada pelo seu modelo PI equivalente, utilizando-se os seguintes valores:

Z11.....(0,059139 + j 0,572202) Ω /km
 Z21.....(0,054238 + j 0,281656) Ω /km
 Z22.....(0,056907 + j 0,574938) Ω /km
 Z31.....(0,055349 + j 0,279948) Ω /km
 Z32.....(0,054238 + j 0,281656) Ω /km
 Z33.....(0,059139 + j 0,572202) Ω /km
 C11.....12,801645 nF/km
 C21.....2,206613 nF/km
 C22.....12,600693 nF/km
 C31.....-1,933265 nF/km
 C32.....-2,206613 nF/km
 C33.....12,801645 nF/km

Para a simulação do referido caso de ferrorressonância, foi modelado o circuito trifásico mostrado na Fig. 9, que se refere a um sistema elétrico canadense em 1100 kV, para análise de ferrorressonância com o programa ATPDraw [2], [11].

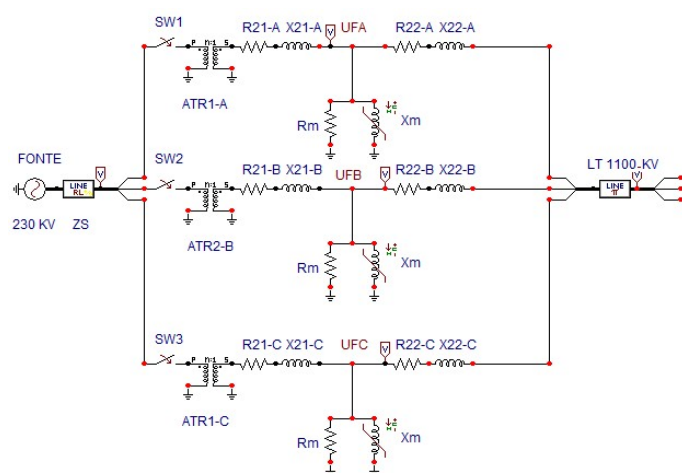


Fig. 9. Modelagem do sistema para análise de ferrorressonância.

A Fig. 10 mostra o resultado da tensão do sistema quando da abertura da Fase A, com um comportamento típico de condições de ferrorressonância, obtido com o ATPDraw [11].

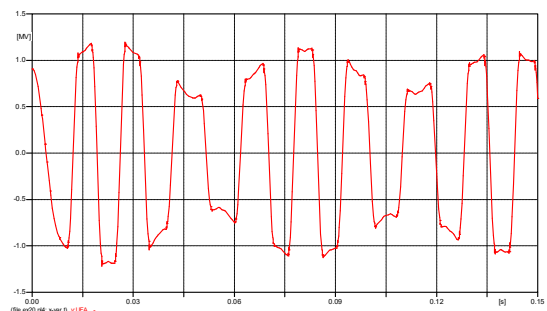


Fig. 10. Tensão resultante durante ocorrência de ferrorressonância.

Com base nos resultados de simulação desse caso, apresenta-se na Fig. 11, a análise realizada pelo Prof. H.W. Dommel, utilizando o programa Microtran, evidenciando resultados muito semelhantes entre ambas as simulações [8].

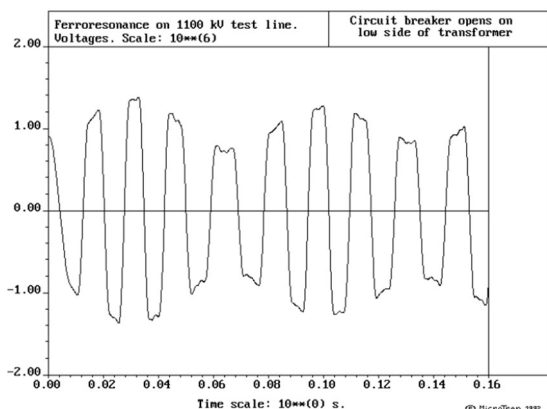


Fig. 11. Tensão resultante durante ocorrência de ferrorressonância [8].

A seguir, na Fig. 12, apresenta-se o resultado obtido na simulação da corrente no indutor não-linear, no programa ATPDraw, verificando-se assim o efeito da saturação.

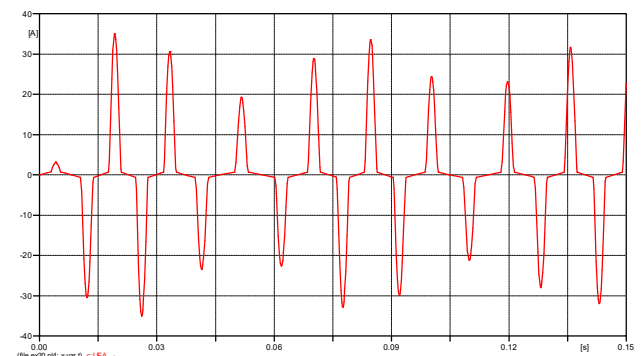


Fig. 12. Corrente do indutor durante ocorrência de ferrorressonância.

V. ANÁLISE DOS CASOS DE SIMULAÇÕES

Considere um sistema de distribuição com alimentação de um transformador a vazio com um cabo subterrâneo conforme mostrado na Fig. 13, conforme [2], [10], [12].

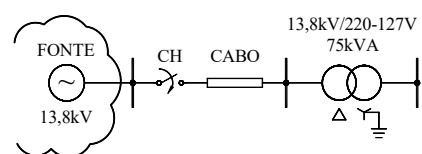


Fig. 13 Modelagem do sistema elétrico de distribuição.

Os dados para o sistema em análise são os seguintes:

Tensão nominal: U_M	13,8 kV
Impedância do Sistema	Barramento Infinito
Bitola dos Cabos	70 mm ²
Resistência elétrica R_C	0,000343 Ω /m
Reatância indutiva XL_C	0,00135 Ω /m
Capacitância: C_C	0,000284 μ F/m
Potência nominal S_N	75 kVA
Tensão primária U_{1N}	13,8 kV
Tensão secundária: U_{2N}	220/127 V
Conexão	Dy1
Impedância percentual: $Z\%$	3,5%
Corrente a vazio: I_0	1,6%
Perdas a vazio: P_0	285 W
Perdas em carga: P_{CC}	1170 W

A Fig. 14 mostra a curva de saturação não-linear associada a reatância X_M , utilizada nas simulações do sistema da Fig. 8.

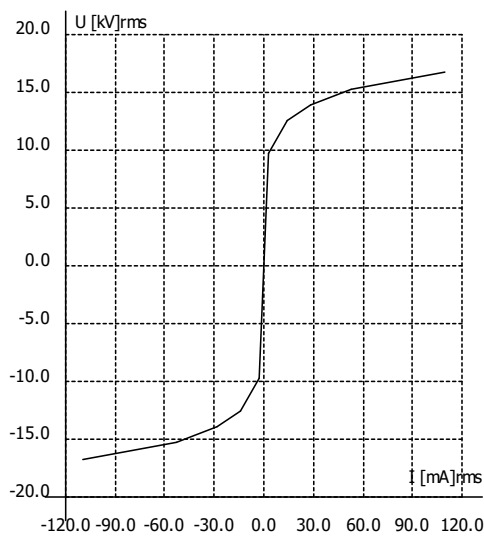


Fig. 14 Curva de saturação do transformador de 75 kVA

B. Caso 1: Manobra de Abertura com Tensão Nominal

O circuito equivalente adotado para simulação de manobras monophasadas está apresentado a seguir, por meio da modelagem no ATPDraw, conforme apresentado na Fig. 15.

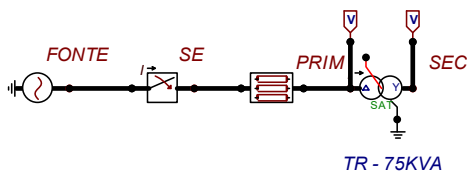


Fig. 15 Modelagem do circuito para análise de ferroressonância

Como premissa adotada no caso base (Caso 1), além da tensão nominal, considerou-se na simulação a abertura da fase A em $t = 0,02$ (s), com uma distância de 50 (m) para o cabo entre o equipamento de manobra e o transformador. A Fig. 16 mostra o comportamento da tensão no lado primário do transformador, onde se verifica que, após a abertura da chave da fase A, ocorre o amortecimento com tendência a zero. No lado secundário, como esperado, a tensão da fase C permanece normal, enquanto as demais fases sofrem redução devido à abertura de uma fase no lado primário, como pode ser observado na Fig. 17.

Portanto, com uma distância de 50 m adotada para o cabo, não foram verificadas sobretensões.

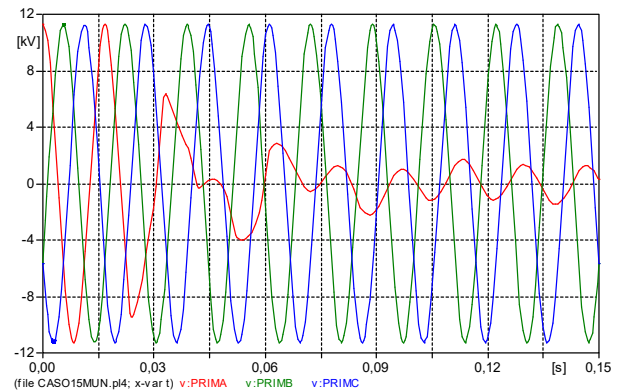


Fig. 16 Tensões no lado primário com abertura monopolar da fase A.

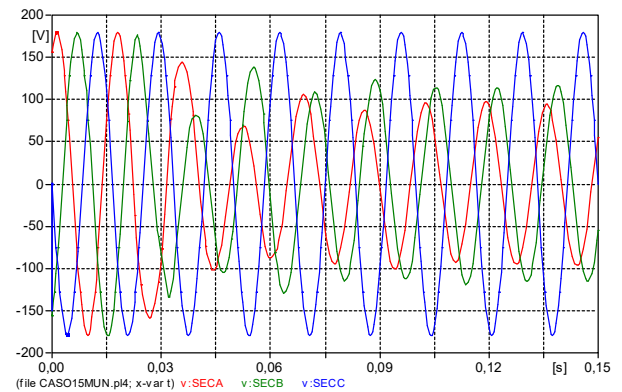


Fig. 17 Tensões no lado secundário com abertura monopolar da fase A.

A. Caso 2: Variação da Tensão Aplicada

Estes casos foram propostos para verificar os efeitos das amplitudes das tensões da fonte no sistema elétrico em análise. Os resultados referem-se ao mesmo circuito da Fig. 15, com o transformador de 75 kVA, cabo com distância de 50 m, modelados no programa ATPDraw, variando-se a tensão da fonte, que foi aplicada com valores de 1,05, 1,075 e 1,1 pu. A Fig. 18 ilustra o comportamento das tensões nos terminais do transformador para a simulação com 1,05 pu, verificando que, assim como no caso de aplicação da tensão nominal (13,8 kV), ocorreu o amortecimento das tensões após a manobra de abertura, conforme comparação direta entre as formas de onda destacadas na Fig. 18 e 16.

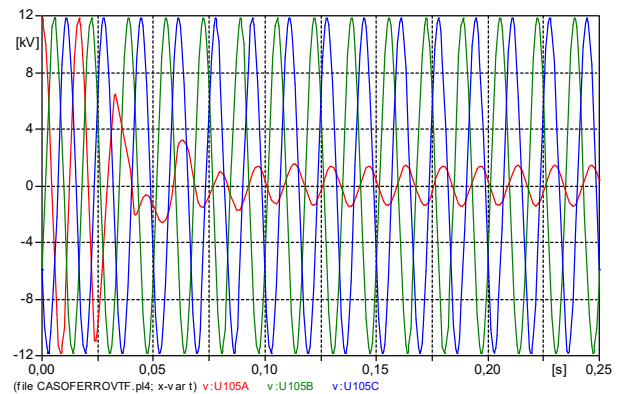


Fig. 18 Resultados obtidos com tensão aplicada de 1,05 pu.

O comportamento das tensões resultantes nos terminais do transformador, para uma fonte de entrada com tensão ajustada para 1,075 pu, está apresentado na Fig. 19.

Diferentemente dos casos anteriores (até 1,05 pu), para esse caso, ocorreu a condição de sobretensões devido a manifestação da ferorrressonância, indicando que o valor da tensão da fonte teve relação com tal condição no sistema analisado.

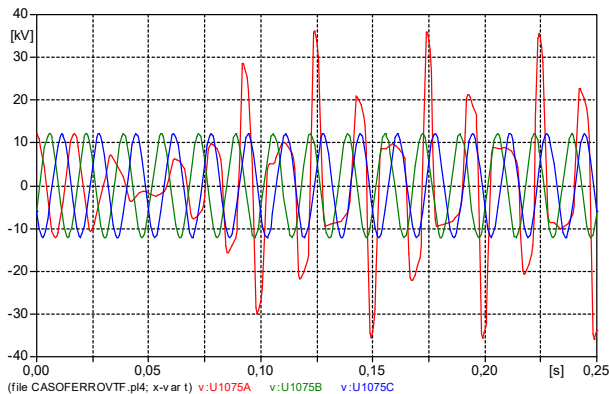


Fig. 19 Resultados obtidos com tensão aplicada de 1,075 pu.

Para confirmar a tendência de sobretensões ressonantes com o aumento da tensão aplicada, simulou-se uma fonte com 1,1 pu, e, assim como no caso de 1,075 pu, as oscilações decorrentes da ferorrressonância ocorreram, conforme ilustra a Fig. 20.

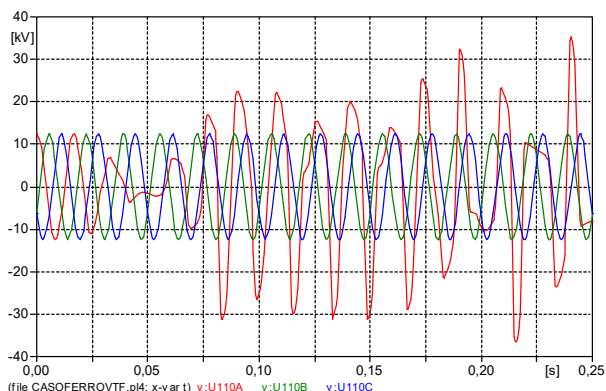


Fig. 20 Resultados obtidos com tensão aplicada de 1,1 pu.

B. Caso 3: Variação dos Comprimentos dos Cabos

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo básico adotado, realiza-se uma variação sequencial dos comprimentos dos cabos entre o disjuntor de manobra e o mesmo transformador de 75 kVA dos casos anteriores. Inicialmente, realiza-se a verificação de cabos mais curtos, ou seja, comprimentos entre 5 e 40 m, na comparação com o caso base de 50 m (Fig. 16).

A Fig. 21 mostra os resultados comparativos, verificando maiores elevações na tensão para os casos com 20 e 10 m, respectivamente, sendo que ocorreu um amortecimento para os casos com distâncias de 5 e 40 m.

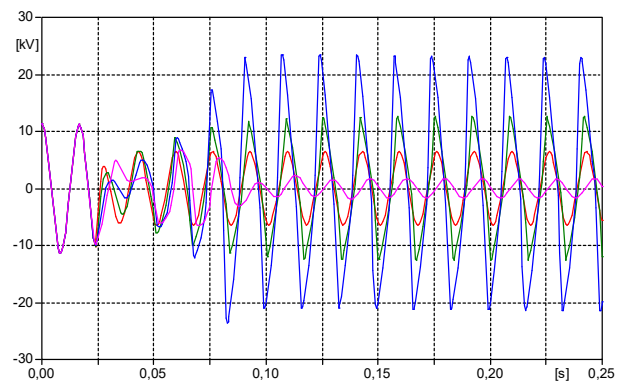


Fig. 21 Resultados com tensão nominal e variação do comprimento do cabo (5 m, 10 m, 20 m e 40 m).

A partir de determinadas condições, as sobretensões se mostraram mais severas. Para demonstrar tal condição, a Fig. 22 apresenta os resultados das simulações, considerando distâncias entre 100 e 400 m. Além do caso de 100 m, ainda com amortecimento, nos demais casos, ocorreram sobretensões ferorrressonantes, sendo as mais críticas para os casos com distâncias entre 300 e 400 m.

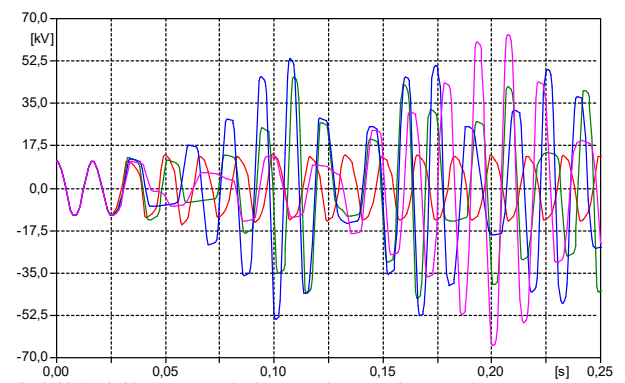


Fig. 22 Resultados com tensão nominal e variação do comprimento do cabo (100 m, 200 m, 300 m e 400 m).

A Fig. 23 confirma os resultados de sobretensões devido aos eventos de ferorrressonâncias, com os maiores valores para o caso de 500 m, pois, a partir do aumento dessa distância, as sobretensões são novamente reduzidas.

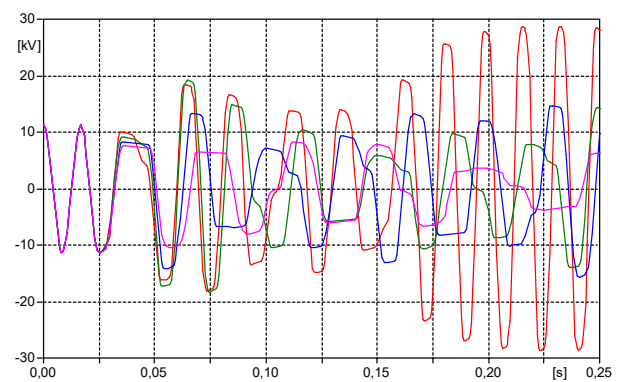


Fig. 23 Resultados com tensão nominal e variação do comprimento do cabo (500m, 600 m, 700 m e 800 m).

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma abordagem técnica sobre os conceitos e análise do fenômeno de ferroressonância em sistemas elétricos. Devido à variedade de configurações dos enrolamentos e núcleos de transformadores, conexões dos sistemas, várias fontes de capacitâncias e aspectos não-lineares, os cenários em que a ferroressonância pode ocorrer são ilimitados.

Foram apresentadas as condições com maiores probabilidades em termos de sobretensões devido à interação das capacitâncias do sistema com as indutâncias não lineares, as quais são representativas de reatores, TPs e transformadores, em função da utilização de circuitos magnéticos. Inicialmente, foram apresentados os resultados na reprodução de um caso de ferroressonância em um sistema de 1100 kV, comparando-se os resultados obtidos com programa ATPDraw e com o Microtran, conforme [8], permitindo assim validar a modelagem equivalente do sistema. Para os casos envolvendo manobras de abertura de sistemas de distribuição, comprovou-se a tendência da ferroressonância em função do aumento das tensões de operação antes da abertura de uma das fases do sistema de alimentação.

Foram ainda analisados dois casos com variação das distâncias dos cabos entre o disjuntor e o transformador, determinando-se as faixas mais críticas, sendo que nos referidos casos analisados com tensão nominal, as sobretensões mais críticas ocorreram com comprimentos dos cabos na faixa entre 200 e 500 m.

Portanto, foram apresentadas duas análises de casos envolvendo um autotransformador de AT e manobras de transformador de distribuição, além de medições reais em campo e análise de ferroressonâncias [8], [9], [10], [11]. Uma outra condição em potencial da ocorrência de fenômenos de ferroressonâncias em sistemas elétricos são relatados a condições de transformadores de potencial (TP), sejam em sistemas de AT ou sistema de MT [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Os recentes trabalhos envolvendo o tema mostram que ainda continua sendo um desafio em termos de sua própria origem não linear, sendo apresentadas metodologias e descrição de casos envolvendo condições de sobretensões ferroressonantes e soluções [18], [19], [20], [21]. Sendo as condições de estabelecimento do fenômeno de ferroressonâncias complexas como a condição pré-manobra, características dos sistemas e equipamentos, deve-se representar o sistema o mais fielmente para obter respostas condizentes a esse tipo de evento.

As tensões do sistema antes da mudança de estado são diretamente correlacionadas a ocorrência em condições desequilibradas, portanto, devido à importância desses parâmetros é recomendável uma análise mais aprofundada de sensibilidade. Quanto aos procedimentos e métodos de mitigação do impacto de eventos de ferroressonâncias, pode-se citar algumas propostas em função dos tipos de sistemas. Para sistemas de distribuição, deve-se evitar religamentos monopólares, quando identificado o fenômeno, devido às aberturas monopólares com transformadores a vazio. Já para os transformadores de potencial normalmente são aplicados resistores de amortecimento, não sendo recomendado enrolamentos operando na condição a vazio, bem como equipamentos com curvas de saturação facilmente saturáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Greenwood, Allan: "Electrical Transients in Power Systems", Wiley Interscience, New York, 1971.
- [2] GSI, RT761/001-11: Treinamento de simulação de sistemas elétricos utilizando o programa ATPDraw, Taubaté, 2011.
- [3] P. Ferracci. Ferroresonance; Cahier Technique n° 190, Groupe Schneider, 1998.
- [4] Soares, Vera L. de C. e M., Rafael, L.: Sobretensões por ferroressonância em sistemas de 230 kV, V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Grupo IV - Sistemas de Potência (GSP), Recife (PE), 1979.
- [5] IEEE Slow Transients Task Force. Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients - Part III: The Study of Ferroresonance; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.15, n°1, 2000.
- [6] S. Santoso, R.C. Dugan, T.E. Grebe, P. Nedwick. Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution Systems; IPST, 2001.
- [7] U. Karaagac, J. Mahseredjian, L. Cai, "Ferroresonance Condition in Wind Parks", IPST - International Conference on Power Systems Transients, Cavtat, Croatia June 15-18, 2015.
- [8] Jesus, N.C.; Neto, J.A.M.; Batista, E.L.; Eidt, M.; Koch, N.; Cogo, J.R.; Dommel, H.W.; "Análise da Queima de Pára-Raios de Óxido de Zinco (ZnO) durante Fenômenos de Ferroressonância em um Sistema de Distribuição, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Grupo X - Sobretensões e Coordenação do Isolamento (GSC), Uberlândia (MG), 2003.
- [9] H.W. Dommel, "Case Studies for Eletromagnetic Transients", UBC, Third Edition, August 2006.
- [10] Soares, Vera L. de C. e M., Rafael, L.: Sobretensões por ferroressonância em sistemas de 230 kV, V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Grupo IV - Sistemas de Potência (GSP), Recife (PE), 1979.
- [11] L. Viena, F. Moreira, N. Ferreira, A. De Castro, N.C. Jesus, "Analysis and application of transformer models in the ATP program for the study of ferroresonance", 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin, America, T&D, pp. 738-744, 2010.
- [12] U. Karaagac, J. Mahseredjian, L. Cai; Ferroresonance Conditions in Wind Parks, IPST – International Conference on Power Systems Transients, Cavtat, Croatia, June 15-18, 2015.
- [13] Tarko, Rafał, Wiesław Nowak, Jakub Gajdzica, and Stanisław Czapp; "Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations" Energies 17, no. 10: 2423. 2024. <https://doi.org/10.3390/en17102423>
- [14] W. Piasecki, M. Stosur, T. Kuczek, M. Kuniewski, R. Javora.; "Ferroresonance in MV Voltage Transformers: Pragmatic experimental approach towards investigation of risk and mitigating strategy", IPST – International Conference on Power Systems Transients, Republic of Korea, June 26-29, 2017.
- [15] Kraszewski, Wojciech, Przemysław Syrek, and Mateusz Mitoraj. 2022. "Methods of Ferroresonance Mitigation in Voltage Transformers in a 30 kV Power Supply Network" Energies 15, no. 24: 9516. <https://doi.org/10.3390/en15249516>.
- [16] Oliveira, D.S.; Leal, G. C. B.; Costa, J. A.V.; Emmerk, E.L.V.; Aredes, M.; "Análise de Fenômenos de Ferroressonância e Autoexcitação em Sistemas de Energia Submarinos", XXIII CBA - Congresso Brasileiro de Automação, vol.2, N° 1, 2020, <https://doi.org/10.20906/CBA2022>.
- [17] Abdel-hamed, A.M., El-Shafly, M.M. & Badran, E.A. A new method for ferroresonance suppression in an IEEE 33-bus distribution system integrated with multi distributed generation. Sci Rep 13, 3381 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30268-w>.
- [18] Bronzeado, H.S.; Emin, Z.; Kocis, L.; Shim, E. B.; "Review of Ferroresonance Phenomenon on Power Systems: Practical Examples and Experience with Adopted Solutions", Symposium Cigré, Recife, 2011.
- [19] V. Arun kumar, S. Elango, M. Prabu, B. Ramraj, "Transient Overvoltages And Its Prevention And Protection," International Journal of Engineering Trends and Technology., vol. 68, no. 3, pp. 22–25, 2020.
- [20] A. Akinrinde, A. Swanson, R. Tiako, "Investigation of Temporary Overvoltage on Microgrid with Emphasis on Ferroresonance," Int. J. Eng. Res. Africa, vol. 39, pp. 32–46, 2018.
- [21] - H. S. Nogay, T. C. Akinci, M. I. Akbas and A. Tokić, "Diagnosis of Chaotic Ferroresonance Phenomena Using Deep Learning," in IEEE Access, vol. 11, pp. 58937-58946, June 13th, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3285816.