



**XXI SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - GDS

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AUTO-TRANSFORMADOR ADZ ATRAVÉS DO SOFTWARE ATP

André Luiz Maduro Pereira(*)
SIEMENS LTDA

Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior
UNIFEI

Prof. Dr. José Policarpo G. de Abreu
UNIFEI

RESUMO

O projeto descrito tem por meta modelar, através software ATP, e investigar a utilização do autotransformador em zigue-zague (ADZ) com controle de módulo e de fase de tensão feitos de forma independente como filtro de correntes harmônicas, especificamente em conversores de 24 pulsos. Objetiva-se a preservação da qualidade do suprimento no que tange as distorções harmônicas. Ademais, a sistemática aqui focada reduz o custo financeiro envolvido quando do emprego de transformadores convencionais. Situações comuns no sistema elétrico, caracterizando perda de qualidade da energia, foram selecionadas para os estudos de desempenho do retificador de 24 pulsos com o transformador especial ADZ.

PALAVRAS-CHAVE

ATP, Filtros, Harmônicos, Modelagem Computacional, Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

1.0 - INTRODUÇÃO

O uso de dispositivos e equipamentos baseados na eletrônica de potência vem acarretando uma crescente preocupação relacionada à Qualidade da Energia Elétrica - QEE. Estes equipamentos causam uma série de distúrbios indesejáveis que comprometem o funcionamento adequado dele mesmos e dos demais equipamentos.

Dentre os itens que definem uma rede elétrica com má qualidade, as distorções harmônicas presentes na tensão de suprimento e seus efeitos nos diversos equipamentos eletrônicos, têm constituído, nos últimos tempos, assunto que domina os interesses de pesquisas e publicações [1].

Alguns estudos já foram realizados de modo a determinar os efeitos desses distúrbios e suas soluções, muitos destes utilizando simuladores como o ATP – *Alternative Transients Program*, que nos proporciona resultados confiáveis em tempos mínimos, facilitando a prática destes dos mesmos. Um dos grandes problemas para a análise de sistemas através destes simuladores é que há necessidade de modelos eficientes e precisos para cada um dos equipamentos presentes no sistema, o que aumenta a dificuldade destes estudos, requerendo uma maior experiência do usuário para avaliação dos resultados obtidos.

Almejando a preservação da qualidade do suprimento no que tange às distorções harmônicas, assim como para os demais itens de definição da qualidade, faz-se muitas vezes necessária a utilização de técnicas para a mitigação dos fenômenos prejudiciais ao atendimento dos padrões definidos. Dentro deste cenário nasceu este projeto, o qual objetiva propor, modelar e avaliar o desempenho da filtragem de correntes e tensões harmônicas através de autotransformadores com controle de módulo e de fase de tensão (ADZ) [2],[6], para solução dos reconhecidos problemas de falta de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Neste trabalho, o autotransformador é, especificamente, aplicado a conversores de 24 pulsos, largamente utilizados nos fornos a arco (industrialmente) bem como em transmissão de grandes quantidades de potência em alta tensão (HVDC). Esta, por muitas vezes, apresentou-se como melhor solução técnico-econômica.

Vale ainda lembrar que a sistemática aqui focada reduz o custo financeiro envolvido quando do emprego transformadores convencionais, devido ao menor custo das partes ativas nos autotransformadores para pequenas relações de transformação.

2.0 - COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES E AUTOTRANSFORMADORES

Um transformador convencional pode ser convertido em um autotransformador, através de conexão elétrica entre as bobinas. Conforme descrito em [2] é possível verificar matematicamente que quanto menor a relação de transformação do autotransformador, menores serão: as quedas de tensão, as perdas de potência, a corrente de excitação, maior será o rendimento e melhor a regulação. A grande vantagem está no menor custo das partes ativas para pequenas relações de transformação, conforme já consagrado na bibliografia clássica [3] e [4].

3.0 - CONCEPÇÃO FÍSICA DO ADZ

Em sua concepção básica o ADZ tem, por fase, uma bobina principal e duas bobinas auxiliares [2]. É ligado como autotransformador com conexão das bobinas comuns em estrela e conexão das bobinas comuns e série em zigue-zague. A Fig. 1 esclarece.

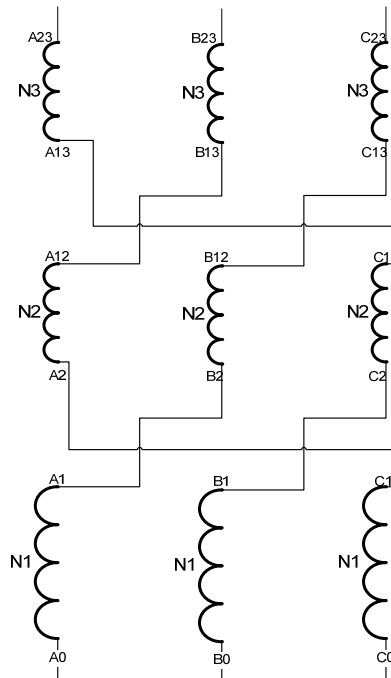


FIGURA 1 – Concepção básica do ADZ.

As bobinas N2 e N3, conectadas em zigue-zague, são providas de taps, para que o ajuste do módulo e ângulo da tensão seja feito.

A equação do fasor tensão de saída \dot{U}_s é [1]:

$$\dot{U}_s = [1,0 - 0,5(T_1k_1 + T_2k_2)0,1] + j[-0,866(T_1k_1 - T_2k_2)] \quad (1)$$

onde k_1 e k_2 representam as polaridades das bobinas e podem assumir os valores +1 e -1. T_1 e T_2 representam os taps.

4.0 - CONVERSOR DE 24 PULSOS COM O ADZ

A Fig.2 ilustra um sistema conversor de 24 pulsos, alimentado por dois transformadores de três circuitos do tipo Y/Y/ Δ , e o autotransformador ADZ. O sistema conversor de 24 pulsos é basicamente formado pela associação de quatro pontes conversoras de 6 pulsos alimentadas com transformadores cujas tensões de saída estão defasadas de 15° entre si, obtidas da seguinte maneira 0° (Y/Y), 30° (Y/ Δ) e 15° no ADZ.

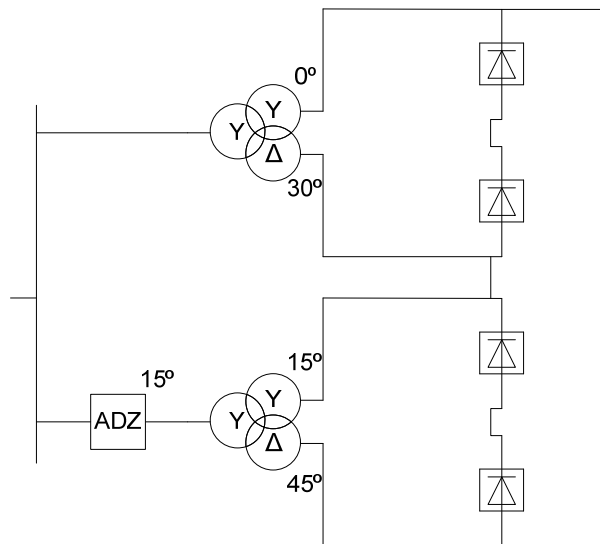


FIGURA 2 – Conversor de 24 pulsos com o ADZ.

A defasagem de 15° é classicamente obtida com um transformador delta/zigue-zague, que além de maior custo, possui maior conteúdo harmônico na corrente, como poderá ser comprovado.

5.0 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Devido a não possibilidade de se implementar o circuito magnético diretamente no ATP [5] na forma como é construído visto que este software trabalha somente com modelos de circuitos elétricos, será necessário o uso dos cartões do ATP, que nada mais é do que um arquivo. ATP com a programação interna do bloco. Após a criação do bloco, um circuito simples foi simulado para testar sua eficácia.

Na Fig. 3 temos uma fonte de tensão nominal de 127 V, uma chave que se fecha no tempo (-1) e não abre durante a simulação, o ADZ e uma carga extremamente grande para que o equipamento pareça estar em vazio. Já na Fig. 4 podemos ver o resultado da simulação:

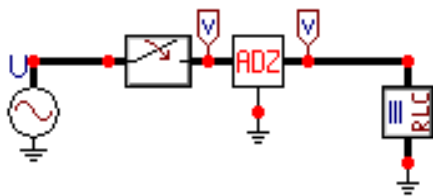


FIGURA 3 – Circuito para simular o funcionamento do bloco

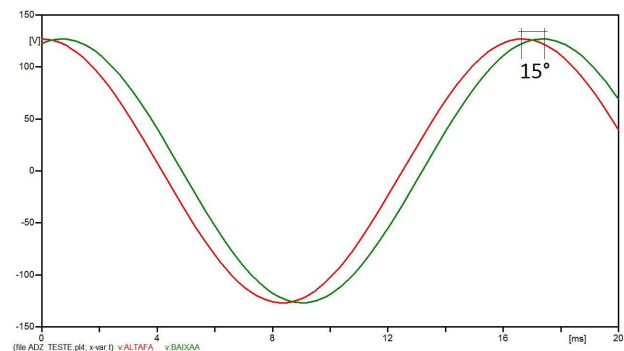


FIGURA 4 – Forma de onda da tensão no ADZ

Aqui, como esperado, as tensões possuem a mesma amplitude e estão defasadas de 15° , provando a funcionalidade do bloco para os objetivos propostos.

6.0 - SIMULAÇÕES NO SOFTWARE ATP E RESULTADOS OBTIDOS

Após a implementação do autotransformador ADZ no software ATP, foram feitas duas simulações. Ambas tratam de uma unidade conversora de 24 pulsos, uma delas utilizando o transformador em Zigue-Zague, para comparação, e a outra utilizando o ADZ. Os principais parâmetros estão descritos abaixo.

A Fig. 5 mostra o circuito simulado para no caso do transformador zigue-zague. Para a simulação com o ADZ a única diferença é substituir o transformador zigue-zague, entre os pontos 3 e 4 pelo bloco do autotransformador como na Fig. 3.

$U_{an}=127e^{-j90,0^\circ}$ [V];
 $U_{bn}=127e^{-j210,0^\circ}$ [V];
 $U_{cn}=127e^{+j30,0^\circ}$ [V];
 Carga: $Z_c=3[\Omega]$;
 Indutância de alisamento: $L_d=10[mH]$.

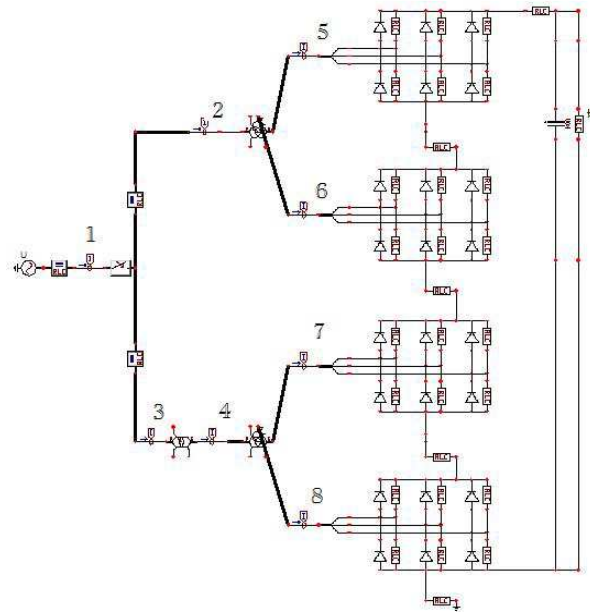


FIGURA 5 – Circuito do conversor de 24 pulsos simulado

Nas Figs. 6 e 7 temos a forma de onda das correntes obtidas no ponto um destacado na Fig. 4, e nas Figs. 8 e 9 os respectivos espectros harmônicos.

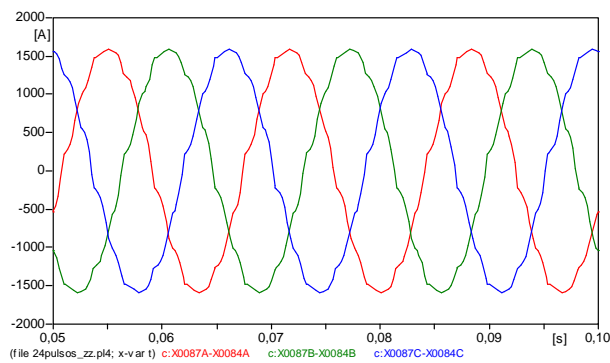


FIGURA 6 – Forma de onda da corrente no ponto 1 utilizado o transformador zigue-zague

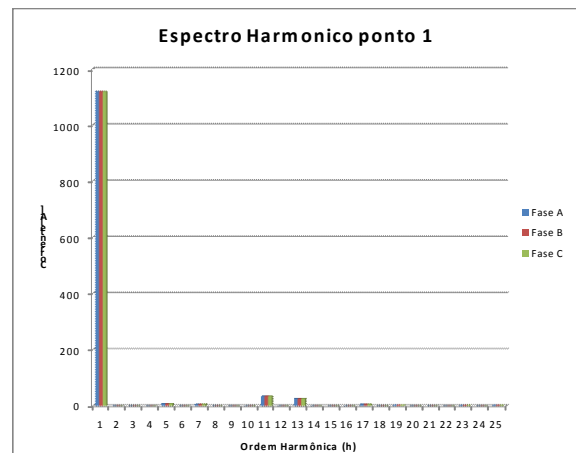


FIGURA 8 – Espectro harmônico da corrente no ponto 1 utilizado o transformador zigue-zague

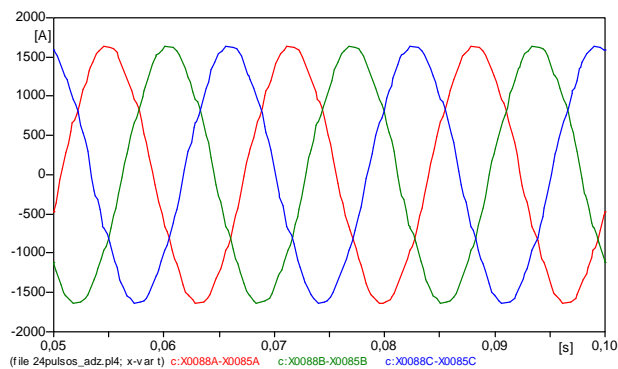


FIGURA 7 – Forma de onda da corrente no ponto 1 utilizado o autotransformador ADZ

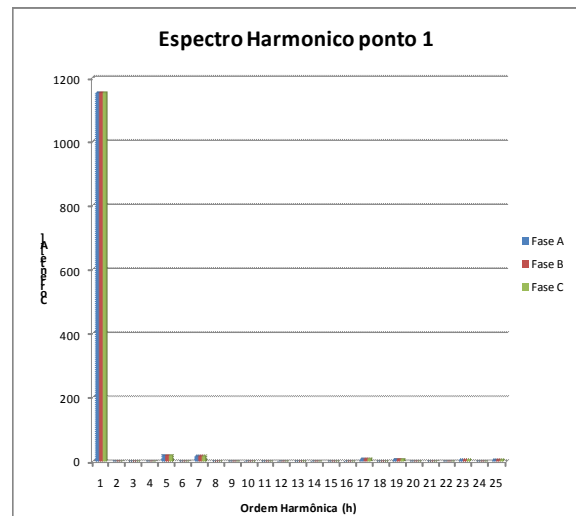


FIGURA 9 – Espectro harmônico da corrente no ponto 1

Utilizando o transformador zigue-zague a Distorção Harmônica Total de Corrente (DTI) foi de 4,1%. Como já mencionado, a utilização do transformador conectado em zigue-zague é comumente utilizado quando da necessidade diminuir o conteúdo harmônico originado por um retificador de 6 e 12 pulsos. Desta forma, utilizando 24 pulsos são necessárias 4 pontes retificadoras, proporcionando um cancelamento harmônico adequado ($h=24k\pm1$).

Já utilizando o ADZ, obtivemos uma Distorção Harmônica Total de Corrente (DTI) igual a 2,7%, o que mostra a melhor eficiência do autotransformador ADZ em relação ao utilizado hoje quando tem-se necessidade de uma unidade conversora com número de pulsos superior a 12. É importante lembrar que além da melhor desempenho, o ADZ é economicamente mais viável, como discutido em [2].

Apesar da forma de onda ser visivelmente melhor no utilizando o ADZ, a tabela 1 abaixo ajuda na compreensão.

Tabela 1 – Comparação da DTI entre o Zigue-Zague e o ADZ

Ponto	Zigue-Zague	ADZ
5	21,7%	21,6%
2	7,1%	7,1%
3	5,6%	7,1%
1	4,1%	2,7%

7.0 - FATORES DE INFLUÊNCIA NO FUNCIONAMENTO DO RETIFICADOR DE 24 PULSOS COM O TRANSFORMADOR ADZ

A tabela 2 sintetiza as situações selecionadas para os estudos de desempenho do retificador de 24 pulsos com o transformador especial ADZ sob distintos desvios das condições ideais. Para cada caso considerado são caracterizadas as situações e os valores adotados para quantificar os desvios. Estas situações expressam condições operacionais reais, freqüentemente encontradas nos sistemas elétricos. Por tal motivo e, em vista dos impactos que as mencionadas variáveis possam trazer para a operação dos dispositivos, considera-se fundamental avaliar seus efeitos. Os resultados destas análises são expostos a seguir.

Tabela 2 – Casos analisados para as situações operacionais não-ideais com o transformador especial ADZ

Caso	Situação	Características
1	Tensão senoidal desequilibrada ($k=3\%$)	$V_A^0 = 1,35V / 162^\circ$ $V_A^+ = 126,5V / 0^\circ$ $V_A^- = 3,85V / -6,4^\circ$
2	Tensão distorcida equilibrada (DTT=7,1% e $V_1=127V$)	$V_3^0 = 5\%$ $V_5^- = 4\%$ $V_7^+ = 3\%$
3	Abertura do circuito que interliga as pontes, ou defeito em uma das pontes	-----

7.1 Caso 1 ($k=3\%$)

Foi simulado um arranjo para a representação do suprimento elétrico com desequilíbrio de 3%, com os valores de sequência positiva, negativa e zero como indicado na tabela. A Fig. 10 mostra o resultado obtidos para a corrente no ponto 1 (indicado na Fig. 5). A Fig. 11 mostra o espectro harmônico correspondente.

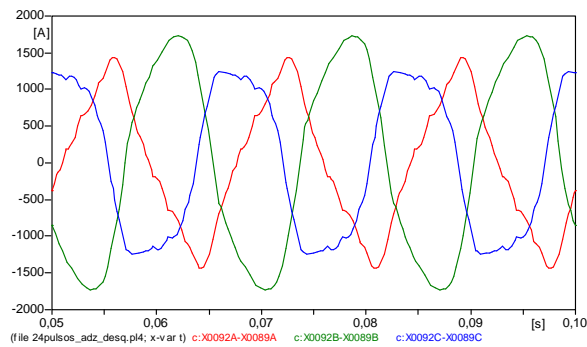


FIGURA 10 – Forma de onda da corrente no ponto 1 – ADZ e tensões desequilibradas

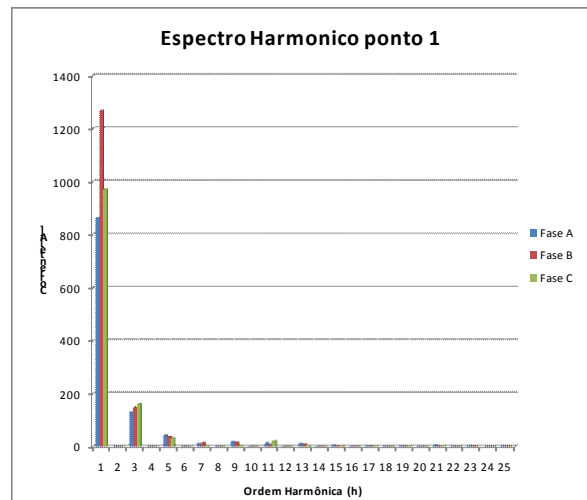


FIGURA 11 – Espectro harmônico da corrente no ponto 1 – ADZ e tensões desequilibradas

Observa-se que, neste caso, apareceu a 3ª harmônica e múltiplas (harmônicas não-características), que só estão presentes em sistemas em que as tensões estão desequilibradas.

A Distorção Harmônica Total de Corrente (DTI) é 16,3%, seis vezes superior ao caso ideal (Fig. 7). Com isso é possível observar que uma DTI de 3% na tensão de alimentação, ainda dentro da norma, causa um aumento de seis vezes da DTI, prejudicando sobremaneira o processo de compensação harmônica em questão. Para uma melhor compreensão dos resultados, segue a Tabela 3, que compara nos pontos já mencionados as DTIs.

Tabela 3 – COMPARAÇÃO DA DTI ENTRE O ADZ IDEAL E ADZ COM TENSÃO DESEQUILIBRADA

Ponto	ADZ ideal	ADZ - Tensão Desequilibrada
5	21,6%	42,9%
2	7,1%	21,5%
3	7,1%	18,4%
1	2,7%	16,3%

7.2 Caso 2 (DTT=7,1%)

No intuito de analisar mais uma situação real do sistema elétrico, foi simulado tal arranjo, com a aplicação de distorção harmônica na tensão de alimentação (DTT=7,1% E $V_1=127V$).

De forma análoga às situações anteriores, será feita a análise à seguir. A Fig. 12 mostra as formas de onda e a Fig. 13 o respectivo espectro harmônico das correntes de linha no ponto 1 do circuito simulado.

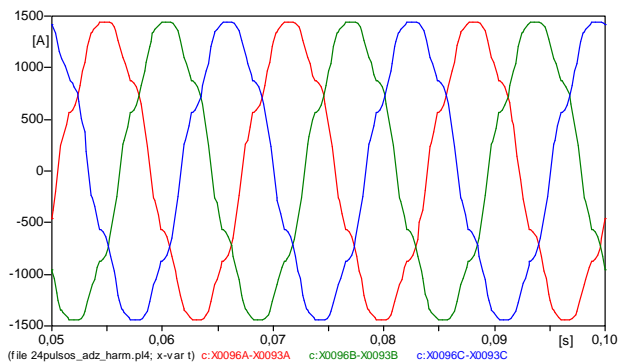


FIGURA 12 – Forma de onda da corrente no ponto 1 – ADZ e tensão distorcida equilibrada

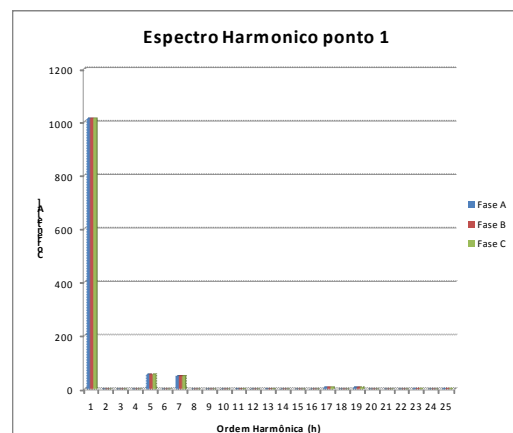


FIGURA 13 – Espectro harmônico da corrente no ponto 1 – ADZ e tensão distorcida equilibrada

Completando a análise, na situação do retificador de 24 pulsos, utilizando transformador ADZ, com ângulo de 15° e tensão de suprimento distorcida equilibrada (DTT=7,1% e $V_1=127V$) foi obtido uma Distorção Harmônica Total de Corrente (DTI) é 7,44%, quase 3 vezes superior ao caso ideal (Fig. 5). Para uma melhor compreensão dos resultados, segue a Tabela 4:

Tabela 4 – COMPARAÇÃO DA DTI ENTRE O ADZ IDEAL E ADZ COM TENSÃO DISTORCIDA EQUILIBRADA

Ponto	ADZ ideal	ADZ-Tensão Distorcida
5	21,6%	21,9%
2	7,1%	9,96%
3	7,1%	10,42%
1	2,7%	7,44%

7.3 Caso 3

Neste caso, a análise será diferente, pois na ocasião de uma falha em uma unidade conversora, as correntes praticamente zeram, e as tensões aumentam de maneira perigosa. Logo o objeto de estudo neste caso será as tensões sobre cada ponte. A Fig. 14 ilustra a tensão sobre a ponte retificadora onde ocorreu a abertura (ou defeito).

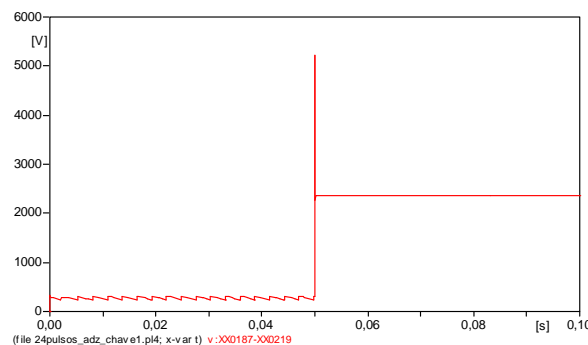


FIGURA14 – Perfil da tensão sobre a ponte retificadora de 6 pulsos que sofreu a abertura ou defeito

Na Fig. 14 é possível verificar que o valor da tensão após a falha é de 2.357 [V], sendo que antes da mesma, tínhamos aproximadamente 300 [V]. Isso significa uma sobretensão de 7,86 p.u. suficiente para danificar completamente a isolamento do sistema. Sobretensões da mesma ordem de grandeza aparecem nas outras pontes em série, o que pode ser verificado por uma análise análoga a anterior.

Diante destes resultados, é fácil concluir que a saída de operação de uma das pontes acarretará danos a toda a isolamento da unidade conversora, e que medidas para evitar que isso aconteça são de grande importância, tais como um sistema de proteção adequado.

CONCLUSÃO

As diversas formas de ondas mostradas evidenciam que é possível a introdução do ADZ substituindo os transformadores usuais, para alimentação de multiconversores com 24 pulsos ou mais, uma vez que nestes casos, entre o ADZ e as pontes existem outros transformadores, eliminando então inconveniente da não isolamento elétrica característica de um autotransformador, mas exatamente por isso apresenta a vantagem de ter menor custo que os transformadores usualmente instalados.

Além do menor custo, ficou claro a melhoria da forma de onda de corrente e tensão do sistema como um todo, dada a utilização do ADZ em detrimento do transformador em Zigue-Zague utilizado atualmente. Isso evidencia a total viabilidade da implantação de tal autotransformador especial nesses casos, trazendo consigo benefícios financeiros e no sistema elétrico.

Com relação às variáveis de influência, estas servem de alerta sobre a eficiência da utilização do transformador ADZ para suprimento de um conversor de 24 pulsos, enfocando aumento nas DTI lidas nos diversos pontos de um conversor desta natureza.

O pior caso verificado leva em consideração problemas que possam ocorrer em uma das pontes trifásicas de 6 pulsos, ocasionando toda a perda do conversor de 24 pulsos, devido a alta tensão que se estabelece entre seus terminais. Logo, como mencionado, um sistema de proteção adequado pode evitar perdas econômicas bastante acentuadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) F.N. Belchior, “**Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos através de dispositivos eletromagnéticos**” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- (2) J.P.G. de Abreu, “**Desenvolvimento e Implementação de um Transformador com Relação de Transformação Complexa Variável – “Phasor Controller”**”, Tese De Doutorado, Unicamp, 1991.K.P. Lopes, “Numerical Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 349-356, Nov. 1994.
- (3) E.E. STAFF DEL M.I.T; **CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES**; Editorial Reverte S.A. ; Barcelona – España -1965
- (4) Martignoni, A. ; **TRANSFORMADORES**; Editora Globo; Porto Alegre Brasil – 1981.
- (5) Site do ATP - <http://www.ece.mtu.edu/atp/>.
- (6) J. P. G. de Abreu, A. J. J. Rezek, R. J. P. Coan, “**Variação do Deslocamento Angular de um Transformador Através de Mudança de ‘Taps’, Sem Alteração de Nível de Tensão**”, 6º Congresso Brasileiro de Automática, pp. 870-874, Belo Horizonte – Brasil, 1986.

DADOS BIOGRÁFICOS



André Luiz Maduro Pereira nasceu em Carmo de Minas (MG), em 1988. Engenheiro Eletricista pela UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá desde 2010, onde autuou como monitor e participou de projetos de pesquisa relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE) e simulações digitais, custeados pela CNPq. Atualmente trabalha na SIEMENS LTDA como *Project Manager* (PM). É responsável pelo fornecimento de projetos “turn-key” de Sistema de Compensação de Reativos – FACTS, gerenciando contratos com empresas do setor elétrico.



Fernando Nunes Belchior foi graduado em 2000, recebeu o título de Mestre em 2003 e Doutor em 2006 em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU-MG, Brasil. No mestrado trabalhou com a influência de afundamentos de tensão em conversores de frequência tipo PWM senoidal. No doutorado trabalhou com dois filtros harmônicos eletromagnéticos, um voltado para a filtragem de harmônicos de sequência zero e outro destinado à filtragem de harmônicos de sequência positiva e negativa. Desde fev/2007 é professor adjunto no Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE) no Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE) da Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI-MG, Brasil. Suas principais áreas de interesse englobam: Qualidade da Energia Elétrica, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência e Medições Elétricas. Já realizou trabalhos de consultoria junto a CPFL, DuPont, Parmalat, CEB, ONS, Elektro, e outros, com participação nas campanhas de medição de Qualidade da Energia Elétrica ocorridas na UFU a serviço do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2001 e 2003. Trabalhou em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) junto a CEB, CEMAT, LIGHT, CHESF.



José Policarpo Gonçalves de Abreu é graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI em 1975. Recebeu o título de Mestre em Ciências também pela EFEI em 1980 e o título de Doutor em Ciências pela Universidade de Campinas - Unicamp em 1991. Desenvolveu o Pós-Doutorado no WPI (Worcester Polytechnic Institute, EUA) em 2000. Abreu é coordenador do GQEE desde a sua fundação e tem sido consultor da Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - Fupai, bem como tem prestado serviços para ONS, CSPE, ANEEL, Enerq, CED, dentre outros. É Co-autor do livro “Transformadores - Teoria e Ensaios” e possui mais de 150 artigos publicados em revistas e congressos nacionais e internacionais.

Foi Coordenador do II SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica em São Lourenço, 1998, e também o Chairman da 10th IEEE PES ICHQP - International Conference on Harmonics and Quality of Power em 2002. Já assumiu por diversas vezes importantes cargos administrativos na EFEI, hoje Universidade Federal de Itajubá, dentre eles a chefia do Departamento de Eletrotécnica.

Ex-membro da Câmara de Assessoramento de Arquitetura e Engenharias (TEC) da FAPEMIG, ele se tornou membro do Conselho Curador da Fundação em 2004 e, em 2008, assumiu a presidência desse órgão.