



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

GPT 17
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS (GPT)

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS SOBRE IMPACTO DA INSERÇÃO DE UMA USINA EÓLICA NO SIN – UM ESTUDO DE CASO

**Angela C S L Guimarães* Antônio Roseval F Freire Janaina M S C Costa
Rita K D M Medeiros Sylvania A Barros**

***Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF.**

RESUMO

Para avaliar o impacto da entrada em operação da Usina Eólica Rio do Fogo sobre as suas instalações, a Chesf elaborou, entre outros, estudos de transitórios eletromagnéticos.

A partir da modelagem dos aerogeradores no ATP, foram simulados a energização de transformadores; curtos-circuitos e aberturas de linhas, estando a usina eólica dentro ou fora de operação.

Esse trabalho vem apresentar os resultados e as conclusões sobre a entrada desse novo tipo de geração e os seus impactos na disponibilidade, desempenho e operação das instalações existentes, especialmente quanto a suportabilidade dos equipamentos e aos ajustes das proteções, visando a garantia da confiabilidade e da segurança do sistema interligado.

PALAVRAS-CHAVE

PROINFA, Geração Eólica, Transitórios Eletromagnéticos, Turbinas Eólicas, Impacto.

1.0 - INTRODUÇÃO

Segundo a Eletrobrás, o programa de diversificação da matriz energética brasileira a partir de fontes renováveis de energia (PROINFA) incorporará ao Sistema Interligado Nacional (SIN) mais de 1300 MW em geração de energia elétrica a partir de turbinas eólicas até dezembro de 2008.

A Central Geradora Eólica (CGE) - Rio do Fogo possui capacidade para gerar 49,3 MW a partir dos seus 62 aerogeradores e está em operação comercial desde junho de 2006. Instalada no Nordeste do Brasil, está conectada ao sistema de distribuição em 69kV derivado da subestação da transmissora Chesf.

Para atender às Normas do PROINFA, os novos acessantes tiveram que apresentar aos Agentes envolvidos e ao ONS um Estudo Complementar de Acesso (4). Os pareceres contemplaram análises de curto-circuito, fluxo de potência e estabilidade dinâmica, para avaliar os impactos na operação do SIN decorrentes da conexão do novo empreendimento.

Com o acesso da CGE – Rio do Fogo, a Chesf elaborou, entre outros, estudos de transitórios eletromagnéticos para avaliar o impacto desta nova geração sobre as suas instalações, onde foram verificados também os aspectos de suportabilidade dos equipamentos quanto às sobretensões e sobrecorrentes transitórias.

Nos estudos da Chesf foi utilizado como ferramenta computacional o programa ATP(3), aonde foram modelados os aerogeradores e os demais componentes da Usina.

Este trabalho vem apresentar as análises e as conclusões dos estudos de transitórios eletromagnéticos para a energização de transformadores em vazio, durante manobras de transformadores, curtos-circuitos em alimentadores e na barra e aberturas de linhas de transmissão com e sem defeitos, perda de cargas no sistema Chesf, com e sem a presença da Usina.

2.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM DOS AEROGERADORES E A INTERFACE COM A REDE ELÉTRICA NO ATP

A CGE - Rio do Fogo têm 61 unidades geradoras com capacidade nominal individual de 800 kW e 01 unidade de 500 kW. Cada turbina(modelo E-48 da ENERCON) é composta de um gerador síncrono desacoplado da rede através de conversores estáticos do tipo retificador-booster-inversor.

Segundo o fabricante, o modelo instalado é um aerogerador com rotor de três pás, controle de passo ativo e velocidade variável de operação, sem caixa de engrenagens. Tem diâmetro de rotor de 45m e altura da torre de 75 m. O gerador multi-pólo atinge potência nominal a uma velocidade de rotor de aproximadamente 32 rpm e uma eficiência de aproximadamente 94 % sobre sua faixa de operação. Para garantir os requisitos e padrões das concessionárias, o aerogerador é conectado à rede através de um transformador e um filtro de alta frequência.

Segundo a ENERCON, a geração de energia elétrica de cada aerogerador se realiza a uma tensão de 400 V, sendo elevada à tensão de 34,5 kV mediante um transformador de 900 kVA adjacente a cada uma das torres. Os aerogeradores se conectam entre si mediante quatro circuitos, ainda em 34,5 kV, e são conduzidos até um transformador elevador principal de 55MVA, estrela (69kV) e delta (34,5kV), na subestação de Rio do Fogo (RFG) e daí até Extremoz (EXT).

A partir da subestação Extremoz (EXT) segue uma linha aérea em 69kV com extensão de 55km até a SE Igapó (IGA). Dessa subestação, a energia é injetada no Sistema Interligado Nacional através de uma linha de conexão de 69kV até a subestação de Natal II da Chesf.

A subestação de Natal II (NTD) e o sistema de 69kV foram representados conforme esquema da Figura 1. Os aerogeradores foram equivalentados e os circuitos coletores internos da Usina foram representados por um capacitor shunt de 2,7Mvar na barra de 34,5kV da subestação de Rio do Fogo (RFG).

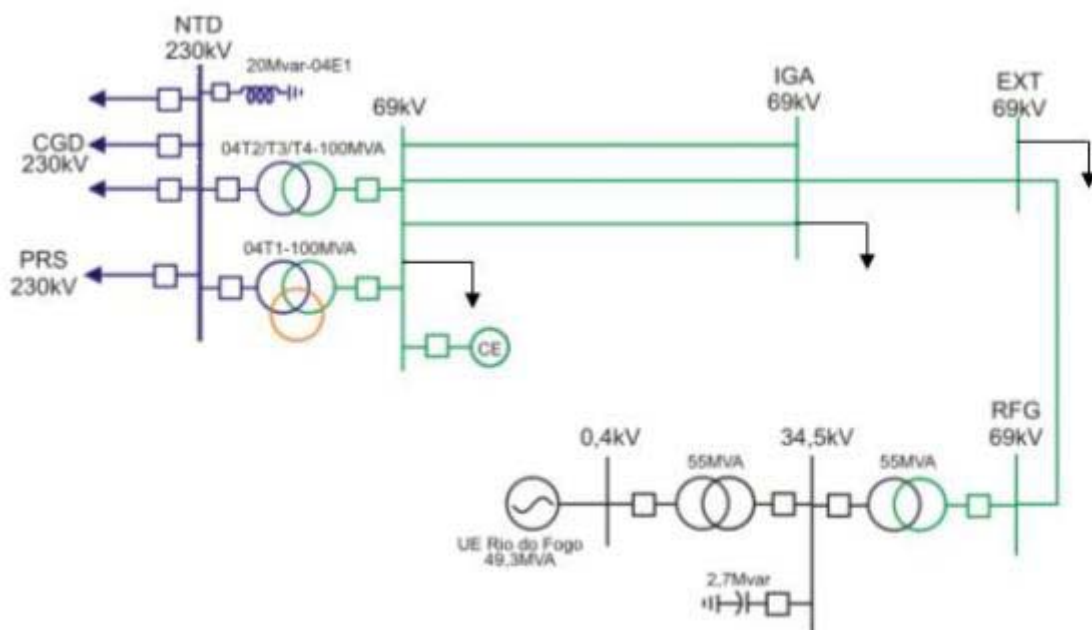


FIGURA 1 – Diagrama unifilar de interligação da CGE- Rio do Fogo ao SIN

Para a elaboração desses estudos, foi utilizado um modelo de turbina eólica (Figura 2) desenvolvido a partir da rotina TACS do ATP (Alternative Transients Program). Nos casos, o equivalente da usina foi representado por um conjunto mecânico das pás; um gerador síncrono a ímã permanente; e o conjunto conversor CA/CC/CA equivalentes, incluindo a técnica de comando das chaves; da rede elétrica e todas as malhas de controle. Os conversores foram modelados por meio de chaves controladas ideais. Para a topologia proposta, dois sistemas de controle foram utilizados: um do lado da rede, para o controle da tensão do barramento CC, otimizando o fornecimento de energia; e outro do lado da máquina, para o controle de velocidade, priorizando a máxima extração de potência mecânica dos ventos. Os algoritmos de simulação desenvolvidos consideraram a existência de um filtro LCL entre o conversor e a rede, conforme indicado na Figura 3. Foram utilizados valores típicos para os parâmetros não fornecidos pelo fabricante, conforme as referências bibliográficas (6) a (10).

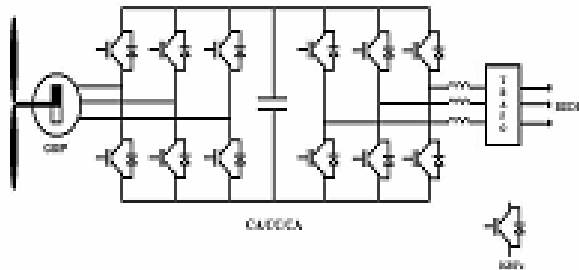


FIGURA 2 – Modelo da Turbina Eólica modelada em ATP

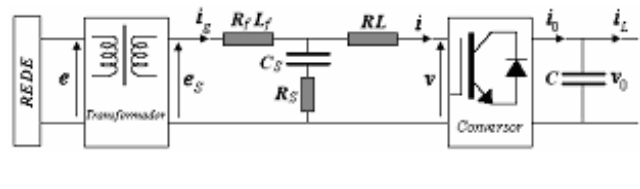


FIGURA 3 -Filtro LCL entre o conversor e a rede.

3.0 - ESTUDOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o impacto da entrada em operação da CGE - Rio do Fogo, sobre as instalações CHESF, foram realizadas algumas simulações de perturbações na rede básica e demais instalações de transmissão. Esse trabalho vem apresentar um estudo de transitórios eletromagnéticos com e sem a presença da Usina, durante manobras de energização de transformadores em vazio, curtos-circuitos e perdas de cargas, com o sistema em condição normal de operação.

3.1 Premissas

A configuração do sistema (Figura. 1) adotada neste trabalho foi similar à utilizada nos Estudos Complementares de Acesso (4). Foi considerada a configuração completa do sistema, carga leve, e a CGE- Rio do Fogo com geração máxima. Tanto para os casos de energização de transformadores, como na simulação de curtos-circuitos e abertura de linhas de transmissão, adotou-se que os transformadores da subestação de Natal II estavam energizados e em carga. Na barra de 230kV da SE Natal II considerou-se a tensão de operação de 242kV(1,05pu).

Para os estudos de energização dos transformadores, foram simulados casos estatísticos nos quais o equipamento em questão foi submetido a 100 manobras. Destas energizações, foram extraídos os tempos de fechamento do disjuntor que geraram as sobretensões e sobrecorrentes de fase e de neutro mais elevadas. Através de um tratamento determinístico foram plotadas as formas de onda e analisado o comportamento das grandezas mais relevantes.

Nos casos de curtos-circuitos, foram simuladas faltas monofásicas na barra de 69kV e em um dos alimentadores de 69 kV Natal II (NTD) – Igapó (IGA), com tempos de atuação conforme ajustes implantados nos relés de proteção da SE Natal II.

Para simular a perda de carga, foram realizadas aberturas em uma das linhas de transmissão em 230 kV entre as subestações de Campina Grande II (CGD) e Natal II, representando a atuação das proteções locais e remotas, estando essas subestações com máxima tensão operativa.

Para fins de simulação, foram somados aos tempos de atuação dos relés os tempos de abertura dos disjuntores e considerados os tempos de viagens dos sinais de transferência de disparo. Para tornar os resultados encontrados mais conservativos, após o instante de curto-circuito numa LT, foi considerado que o primeiro terminal será aberto em 100 ms e o segundo só em 120 ms após o defeito. No caso do curto-circuito na barra, após o defeito, os disjuntores estarão totalmente abertos em 2,1 segundos.

3.2 Suportabilidade dos equipamentos

Em vista da presença de equipamentos na SE Natal II fabricados segundo diferentes especificações, foram tomados como referência os equipamentos com a menor suportabilidade a sobretensões. Assim, a suportabilidade dos equipamentos adotada para essa subestação, é de 1,40 pu a partir do 10º ciclo.

3.3 Energização de transformadores na SE Natal II

Com a entrada da CGE-Rio do Fogo foi necessário reavaliar as condições de manobra para os transformadores da subestação Natal II. Foram levantados os resultados das simulações estatísticas em um intervalo de tempo de 200 ms, em termos de valores máximos das grandezas analisadas, verificados tanto no transformador energizado, como nos demais transformadores conectados à barra de 230kV da SE Natal II, considerando a Usina dentro e fora de operação. Na Tabela 1 estão apresentados os valores das sobretensões e sobrecorrentes transitórias encontradas durante a energização de um transformador 230/69 kV – 100 MVA em vazio na SE NTD, estando os demais transformadores energizados e em carga, com e sem a presença da CGE-Rio do Fogo.

TABELA 1 – Sobretensões e Sobrecorrentes encontrados durante a energização de um transformador 230/69 kV - 100 MVA na SE Natal II, com e sem a presença da CGE-Rio do Fogo

Equipamento	COM a Usina			SEM a Usina		
	I fase (A pico)	I neutro (A pico)	V (230kV) (kV pico f-t)	I fase (A pico)	I neutro (A pico)	V (230kV) (kV pico f-t)
TR 04T4* 230/69kV 100MVA	1043,2 (2,94 pu)	469,8 (1,32 pu)	216,4 (1,15 pu)	942,4 (2,6 pu)	442,2 (1,24 pu)	210,8 (1,12 pu)

*transformador energizado

As Figuras 4 e 5 apresentam as formas de onda da tensão na barra de 230kV e da corrente de fase do transformador 230/69 kV 100 MVA, respectivamente, em termos de valores máximos encontrados durante a sua energização na SE Natal II, considerando a Usina dentro e fora de operação. Observa-se que a presença da CGE-Rio do Fogo implicou em um incremento, tanto quanto à amplitude quanto ao amortecimento, no comportamento dessas grandezas.

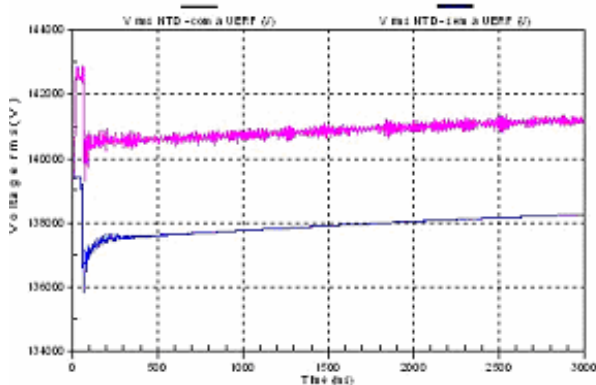


FIGURA 4 – Valores rms das sobretensões encontradas na barra de 230kV da SE Natal II, durante a energização do TR 100 MVA, com (rosa) e sem (azul) a presença da Usina (V, fn pico)

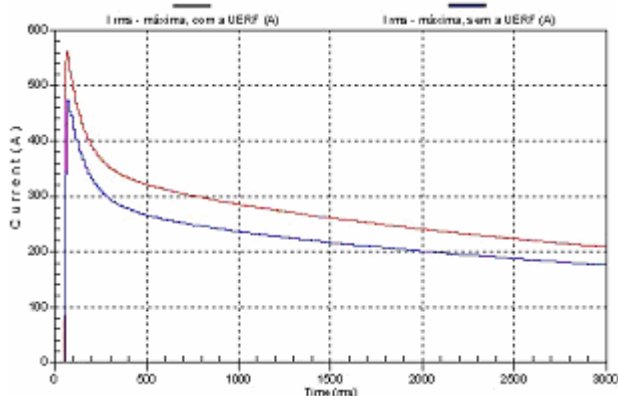


FIGURA 5 – Valores rms das sobrecorrentes de fase encontradas no lado de 230kV do TR 100 MVA, durante a energização na SE Natal II, com (vermelho) e sem (azul) a presença da Usina (A, fn pico)

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os comportamentos da onda da corrente de neutro e do conteúdo de 2º harmônico apresentado, em termos de valores máximos encontrados, durante a energização do transformador 230/69 kV 100 MVA na SE Natal II, considerando a Usina dentro e fora de operação. Verifica-se uma influência importante da presença da Usina, resultando na necessidade de uma reavaliação sobre os ajustes das proteções intrínsecas dos transformadores.

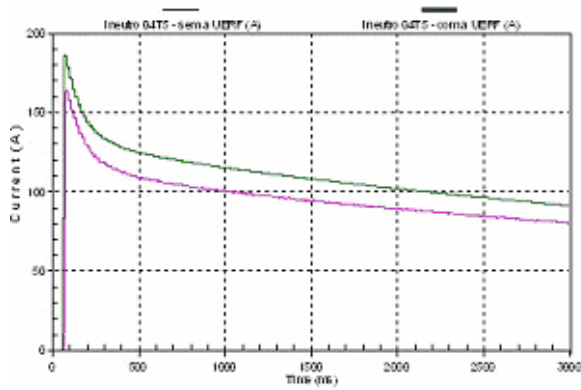


FIGURA 6 – Valores rms das sobrecorrentes de neutro encontradas no lado de 230kV do TR 100 MVA, durante a energização na SE Natal II, com (verde) e sem (rosa) a presença da Usina (A, fn pico)

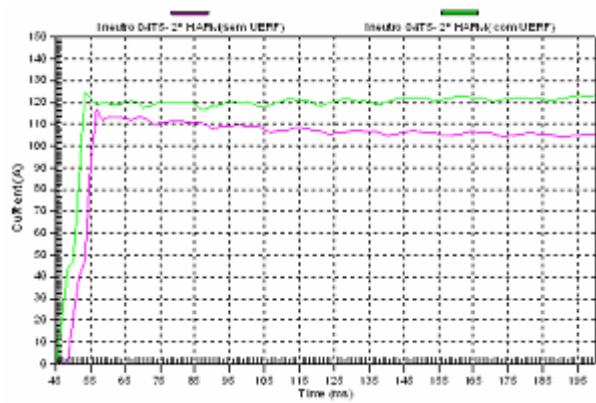


FIGURA 7 – Composição 2º harmônico das máximas sobrecorrentes de neutro no lado de 230 kV do TR 100 MVA, durante a energização na SE NTD, estando a Usina Rio do Fogo fora (rosa) ou em operação (verde) (A pico)

3.4 Análise de curto-circuito

Para avaliar as condições a que ficam submetidos os equipamentos da SE Natal II quando da ocorrência de defeitos monofásicos, foram realizadas simulações de curto-circuito na barra de 69kV da SE Natal II e em um alimentador Natal II – Igapó 69kV, no terminal de Natal II, considerando a atuação correta da proteção.

Para fins de comparação, foi verificada a influência da saturação dos transformadores nos defeitos, e assim foram simulados defeitos nos instantes do pico e do zero da tensão, assim como também avaliado a influência da presença de bancos de capacitores em Natal II 69kV.

Na forma de onda da sobretensão encontrada durante o curto-circuito na barra de 69kV (Figura 8), observamos que durante o defeito, como as proteções de barra têm temporização de 2s, até a abertura total dos disjuntores os equipamentos ficam submetidos a sobretensões fase-terra elevadas que atingem até 1,50pu, permanecendo por mais de 10 ciclos. Verifica-se porém, que durante o curto na barra de 69kV, as sobretensões não se agravaram com a presença do Parque Eólico Rio do Fogo.

Na Figura 9 observamos que durante o defeito no alimentador Natal II – Igapó 69kV, somados os tempos da proteção até a abertura total dos disjuntores, os equipamentos ficam submetidos a sobretensões fase-terra elevadas, mas que permanecem apenas pelo tempo de duração do defeito. Neste caso também, a entrada em operação da Usina pouco elevou as sobretensões encontradas.

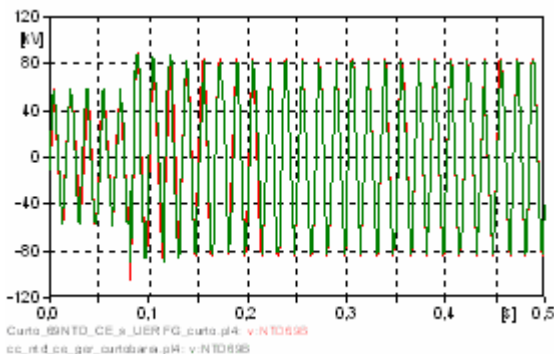


FIGURA 8- Valor da máxima sobretensão encontrada na barra de 69kV da SE NTD, durante um curto monofásico, estando com (verde) ou sem (vermelho) a Usina Rio do Fogo (kV – fn pico).

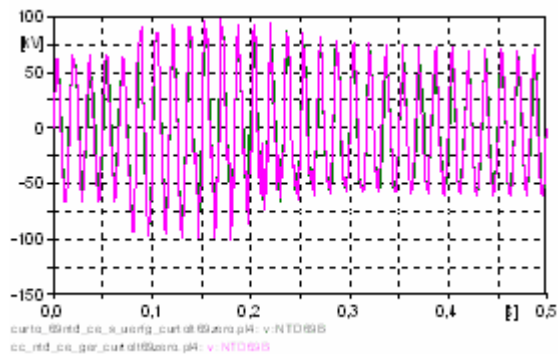


FIGURA 9- Valor da máxima sobretensão encontrada na barra de 69kV da SE NTD, durante um curto monofásico na LT NTD-IGA, estando com (rosa) ou sem (verde) a Usina Rio do Fogo (kV – fn pico).

3.5 Abertura de Linhas de Transmissão

Para complementar os estudos de impacto sobre a entrada em operação da Usina Eólica Rio do Fogo, também foram simuladas perdas de carga. Foram realizadas aberturas nas linhas de transmissão em 230kV entre as subestações de Campina Grande II (CGD) e Natal II, representando a atuação das proteções locais e remotas, estando essas subestações com máxima tensão operativa, ou seja, 242kV (1,05pu).

Na Figura 10 observamos que durante o defeito em uma LT de 230kV Natal II – Campina Grande II, as proteções de linha atuam rapidamente, eliminando o defeito. e até a abertura total dos disjuntores os equipamentos ficam submetidos a tensões elevadas, mas que permanecem por poucos ciclos.

A Figura 11 mostra o comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE NTD durante esse defeito, com e sem a presença do Parque Eólico Rio do Fogo. Verifica-se que o novo acessante pouco contribuiu para as sobretensões encontradas.

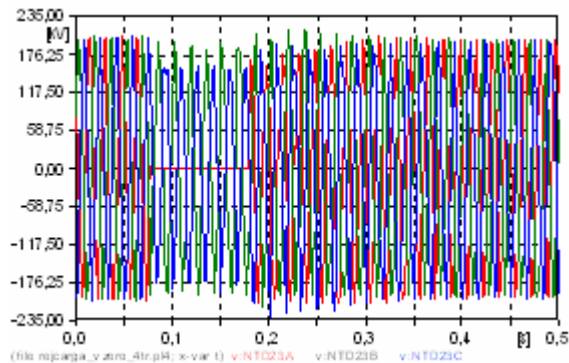


FIGURA 10- Valor da máxima sobretensão encontrada na barra de 230 kV da SE NTD, durante um curto monofásico na LT CGD-NTD, estando a Usina Rio do Fogo em operação (kV – fn pico).

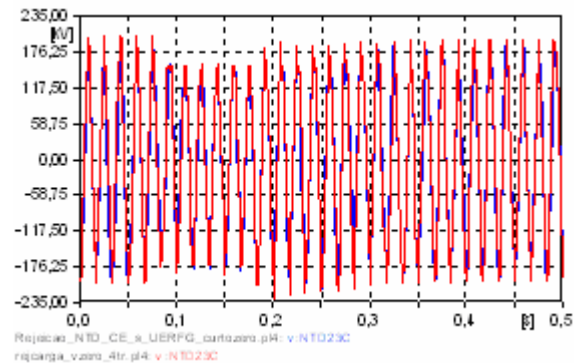


FIGURA 11-Valores das máximas sobretensões na barra de 230kV da SE NTD, durante a abertura da LT CGD-NTD, estando sem (azul) ou com (rosa) a Usina Rio do Fogo em operação (kV – fn pico).

Na Figura 12 está apresentado o comportamento da tensão na barra de 69 kV da SE NTD durante esse defeito, com e sem a presença da CGE - Rio do Fogo. Verifica-se que com ou sem a presença da Usina a forma de onda da tensão sofre afundamentos de até 60%.

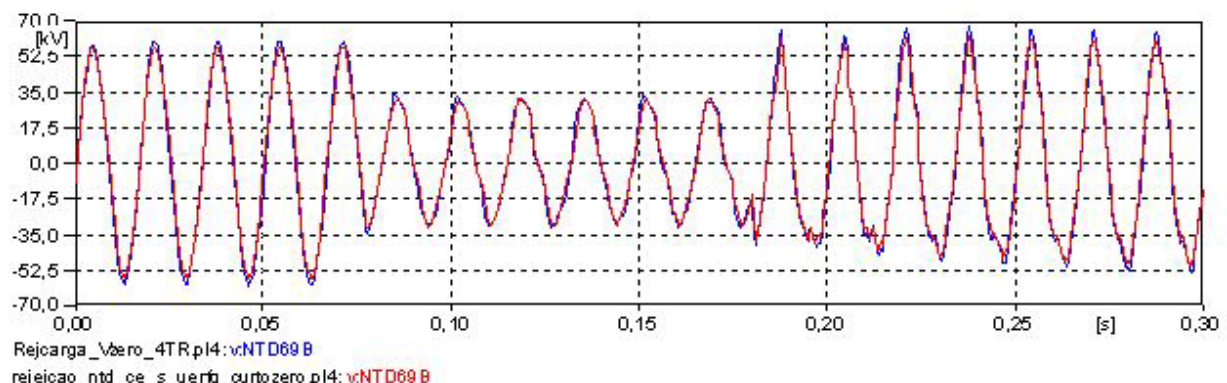


FIGURA 12- Valores das sobretensões encontradas na barra de 69 kV da SE NTD, durante um curto monofásico na LT 230 kV CGD-NTD, estando sem (vermelho) ou com (azul) a Usina Rio do Fogo em operação (kV – fn pico)

4.0 - CONCLUSÃO

Os estudos de Transitórios Eletromagnéticos realizados para avaliar os impactos da Usina Eólica Rio do Fogo na disponibilidade, operação e desempenho das instalações do sistema de transmissão Chesf concluíram que não foram observados sobretensões transitórias que comprometessem a suportabilidade dos equipamentos da subestação de Natal II e por isso não serão necessárias melhorias e reforços para a sua entrada em operação comercial.

Contudo, as análises indicaram que será necessária uma reavaliação dos ajustes das proteções intrínsecas dos transformadores para evitar atuações indesejadas durante manobras de energização na subestação de Natal II.

Os resultados obtidos indicam a importância para as transmissoras da realização dos estudos pré-operacionais de impacto devido a entrada de novos acessantes, estejam eles na rede básica ou não, a fim de resguardar seus equipamentos como também indicar a necessidade de adequação de ajustes de proteções e das instruções operativas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BARBOSA, A.L. B - Sistemas de conversão de energia a velocidade variável -.Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Minas Gerais, 1996
- (2) BLASKO, V., KAURA, V. - A novel control to actively damp resonance in input Lc filter of a three-phase voltage source converter" - IEEE Trans. on Ind. Applications, Vol. 33, No. 2, 1997, pp. 542-550.
- (3) ATP – Alternative Transients Program – RULE BOOK, 1987
- (4) COELBA, Grupo Neoenergia. - Estudos Complementares de Acesso do Parque Eólico Rio do Fogo ao Sistema da Cosern - Relatório 07/EPI/05, 15/12/2005.
- (5) HEIER, S. –JOHN WILEY & SONS - Grid integration of wind energy conversion systems, 1998
- (6) NUNES, M. V. A., ZÜRN, H. H., BEZERRA, U. H., VIEIRA, J. P. A., JÚNIOR, M. F. M., MACHADO, R. N. M., SILVA, S. R., PINHEIRO, R. F., OLIVEIRA, J. T. E SANTOS, F. M. C. S. - New Representation of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Studies — VI Induscon, 2004
- (7) PINHEIRO, E. L. R. - Análise do Comportamento Dinâmico de Usinas Eólicas a Velocidade Variável Utilizando ATPDraw - Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Junho/2004, Belo Horizonte.
- (8) SILVA, S. R. - Análise da Integração de Usinas Eólicas na Rede Elétrica - V SBQEE – Agosto de 2003.
- (9) SLOOTWEG J.G., POLINDER H., KLING W.L. - Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Direct Drive Synchronous Generator and Back to Back Voltage Source Converter and its Controls - 2002(a).. European Wind Energy Conference and Exhibition. Copenhagen, Denmark. 2-6 July 2001
- (10) SLOOTWEG, J. G., KLING, W. L. - Modelling and Analysing Impacts of Wind Power on Transient Stability of Power Systems - 2002(b). Wind Engineering. Vol. 26, no. 1,2002, pp. 3-20.
- (11) SLOOTWEG, J. G., POLINDER, H. AND KLING, W. L. –Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations - IEEE Transactions on Energy Conversion, december 2003

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães

Nascida no Recife, PE em 26 de dezembro de 1973.

Mestrado (2003) e Graduação (1995) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2003

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

Antonio Roseval F. Freire,

Nascido em Recife-PE em 1964

Mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ em 1991.

Pós-graduado em Engenharia da Qualidade pela UFPE em 1995

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1985

Trabalha na CHESF desde 1985, com experiências nas áreas de especificação, ensaios e análise de desempenho de equipamentos de subestações e compensadores estáticos, e nas áreas de planejamento da operação e estudos elétricos de sistemas de potência.

É membro individual do CIGRE.

Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa

Nascida em Catende, PE em 16 de dezembro de 1972.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2002

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

Rita K D M Medeiros

Nascida em Olinda, PE em 27 de janeiro de 1974.

Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2002

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

Sylvia de Almeida Barros

Nascida no Rio de Janeiro – RJ em 1957

Pós-graduada em Engenharia Elétrica pela UFPB em 1985

Graduada em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1980

Trabalha na CHESF, desde 1981, na área de estudos da operação elétrica do sistema.