



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/19
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**ZEROS ATRASADOS EM DISJUNTORES DE 550kV DURANTE MANOBRAS DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS COM REATORES EM DERIVAÇÃO: ESTUDO DO
CASO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FORTALEZA II – PECÉM II – SOBRAL III**

Antonio Roseval F. Freire (*) Fernando Rodrigues Alves André Luiz P. Cruz
Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF)

RESUMO

Nas manobras de energização ou religamento automático de linhas de transmissão com elevado grau de compensação por reatores em derivação, pode ocorrer o fenômeno de zeros atrasados em consequência da componente contínua (CC) presente na corrente através do disjuntor. A interrupção desta corrente transitória pode causar solicitações expressivas nos disjuntores de linha. Apresenta-se neste trabalho uma síntese da análise do fenômeno de zeros atrasados nos disjuntores que manobram linhas de transmissão aéreas de 500kV, compensadas com reatores em derivação, a partir do estudo do caso dos disjuntores das linhas de transmissão Fortaleza II - Pecém II – Sobral III, efetuado por meio de simulações digitais em ATP e da análise dos registros de medições durante manobras realizadas em campo. Também são apresentadas neste trabalho algumas soluções para mitigar o fenômeno analisado.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntores de Alta Tensão, Reator em Derivação, Manobras de Linhas em Vazio, Transitórios Eletromagnéticos, Grau de Compensação, Correntes Transitórias.

1.0 - INTRODUÇÃO

A expansão do sistema de transmissão da Rede Básica, incluindo a necessidade de novas linhas de transmissão, é normalmente definida através de um planejamento centralizado a cargo da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), na forma de estudos de fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade de tensão e estabilidade transitória. O resultado destes estudos é consolidado no Relatório de Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental (relatório R1) que define, entre outros aspectos, os pontos de conexão, traçado, extensão, nível de tensão, capacidade de transmissão e a compensação de potência reativa em série e em derivação (grau de compensação) das linhas de transmissão.

Ainda no âmbito da EPE, a alternativa de expansão selecionada é objeto de um estudo detalhado, incluindo estudos de transitórios eletromagnéticos de manobras das linhas de transmissão, para a definição das características técnicas que são consolidadas no Relatório de Detalhamento da Alternativa de Referência (relatório R2). Este detalhamento visa apenas assegurar a viabilidade da alternativa sob o ponto de vista técnico, sendo os relatórios R1 e R2 insumos e parte integrante do Edital de Licitação do empreendimento, sob a responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Uma vez realizado o Leilão de Transmissão, o Agente vencedor da licitação dispõe de um tempo, previsto no Edital, para a apresentação do Projeto Básico da nova instalação de transmissão, incluindo os relatórios dos estudos mínimos previstos no Edital, contendo a definição das características técnicas e premissas de engenharia

(*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – Sala D201 - Bloco D – CEP 50.761-901 - Recife, PE – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-2485 – Fax: (+55 81) 3229-2393 – Email: roseval@chesf.gov.br

das instalações e as especificações básicas dos equipamentos componentes da nova instalação.

Normalmente as novas linhas de transmissão aéreas em 500kV, quando compensadas por reatores em derivação, são definidas com grau de compensação típico variando de 80% a 90%. Entretanto, um recurso cada vez mais utilizado na fase de planejamento da expansão (relatório R1), é o seccionamento de linhas de transmissão existentes para a conexão de uma nova subestação. O seccionamento altera o grau de compensação dos novos trechos de linha e, portanto, pode afetar as solicitações transitórias impostas aos equipamentos terminais durante manobras.

Entre outros aspectos importantes que devem ser verificados com a alteração do grau de compensação estão as correntes transitórias geradas nas manobras de energização ou religamento automático de linhas de transmissão, quanto à possibilidade de ocorrer o fenômeno de zeros atrasados como consequência da componente contínua (CC) presente na corrente através do disjuntor, quando o grau de compensação excede 50% (1), (2), (3). A interrupção desta corrente transitória pode causar solicitações elevadas nos disjuntores de linha, que não são cobertas pelas Normas Técnicas de Especificação e Ensaio de disjuntores de alta tensão (4). Por outro lado, quando o grau de compensação é inferior a 50% deve ser verificada a possibilidade de interação transitória entre a linha de transmissão compensada e os transformadores de potencial capacitivos (TPC) nos terminais da linha (5). Esta interação transitória pode levar a atuações indesejadas de proteções e até a danificação dos TPC.

2.0 - CONCEITOS BÁSICOS

A Figura 1 mostra o circuito equivalente simplificado utilizado para a análise conceitual do problema de zeros atrasados. Neste circuito a capacitância \underline{C} representa a capacitância total de sequência positiva da linha de transmissão, a indutância \underline{L} representa a indutância equivalente de sequência positiva dos reatores da linha e a resistência \underline{R} representa, de forma simplificada, o efeito conjunto da resistência equivalente das perdas totais na linha e no reator e da resistência equivalente da relação X/R do sistema no ponto de conexão.

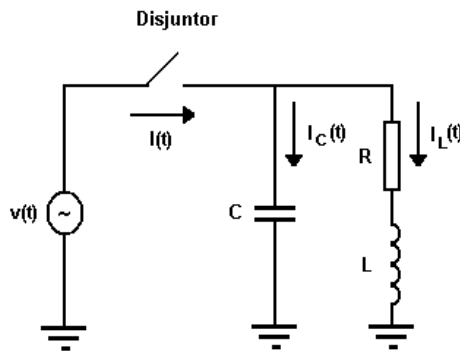


FIGURA 1 – Circuito equivalente simplificado

Considerando que a tensão da fonte é dada pela equação 1, quando a chave é fechada no instante de zero da tensão, a corrente através do disjuntor $I(t)$ é a soma da componente capacitiva $I_C(t)$ com a componente indutiva $I_L(t)$, dadas pelas equações 2 e 3. As equações 4 e 5 definem o grau de compensação da linha de transmissão (k_{sh}) e o fator de qualidade \underline{Q} do circuito.

$$v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$I_C(t) = \omega C V_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$I_L(t) = \frac{V_m}{R^2 + (\omega L)^2} \cdot \left[\omega L \cdot e^{\frac{-R}{L}t} + R \sin(\omega t) - \omega L \cos(\omega t) \right] \quad (3)$$

$$k_{sh} = \frac{1}{\omega^2 LC} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (5)$$

Considerando como aproximação que a relação X/R é muito maior que 1, e reescrevendo as equações 2 e 3 em função do grau de compensação e do fator de qualidade, a corrente transitória $I(t)$ através do disjuntor tem a forma descrita pela equação 6.

$$I(t) = \omega CV_m \cdot \left[k_{sh} \cdot e^{\frac{-\omega t}{Q}} + (1 - k_{sh}) \cdot \cos(\omega t) \right] \quad (6)$$

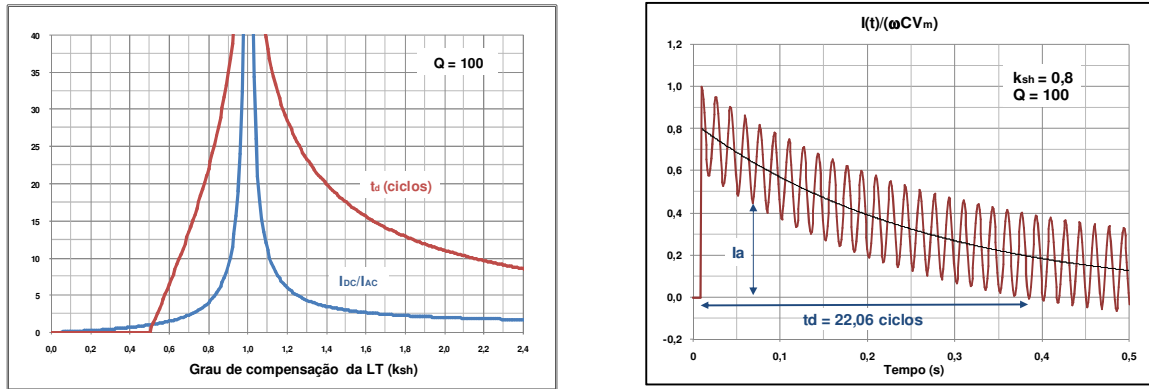
Dentro das aproximações consideradas, quando a componente contínua (I_{DC}) da corrente é maior ou igual ao valor de crista da componente alternada (I_{AC}) poderá ocorrer o fenômeno de zeros atrasados. Através da equação 7 é possível calcular a relação entre as duas componentes. Para k_{sh} menor que 0,5, a relação é menor que 1, ou seja, a componente contínua é inferior ao valor de crista da componente alternada.

$$\frac{I_{DC}}{I_{AC}} = \frac{k_{sh}}{|1 - k_{sh}|} \quad (7)$$

Para valores de k_{sh} maiores ou iguais a 0,5, o tempo de retardo do primeiro zero de corrente, em ciclos, pode ser calculado pela equação 8. O tempo de retardo do primeiro zero de corrente depende do fator de qualidade e do grau de compensação da linha de transmissão. Quanto maior a resistência R , menor o fator de qualidade e, portanto, menor o tempo de retardo t_d .

$$t_d = \frac{-Q}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{|1 - k_{sh}|}{k_{sh}} \right] \quad (8)$$

A Figura 2-(a) mostra os valores da relação I_{DC}/I_{AC} e do tempo de retardo t_d , calculados através das equações 7 e 8, para um fator de qualidade igual a 100, com o grau de compensação variando de 0 a 2,4. Quando o grau de compensação tende para 1 (100% de compensação), no limite, a componente I_{AC} tende a zero e a relação I_{DC}/I_{AC} tende ao infinito. A Figura 2-(b) mostra a forma de onda típica da corrente através do disjuntor de linha $I(t)$ calculada pela equação 6, para os valores indicados de fator de qualidade e grau de compensação. Nesta Figura também está indicado o valor da corrente mínima (I_a) cerca de 3,5 ciclos após o fechamento do disjuntor.



(a) (b)
FIGURA 2 – Ocorrência de zeros atrasados (zero-missing)

Para um dado fator de qualidade e tempo de abertura (t_a) do disjuntor após o fechamento, em ciclos, através da equação 9 é possível estimar o valor mínimo do grau de compensação (k_{min}) para que o módulo da corrente no instante da separação dos contatos seja maior que zero. Quando o grau de compensação excede este valor mínimo, a corrente no instante da separação dos contatos pode ser estimada pela equação 10.

$$k_{min} = \frac{1}{1 + e^{\frac{-2\pi t_a}{Q}}} \quad (9)$$

$$\frac{I_a}{\omega CV_m} = k_{sh} \cdot \left[1 + e^{\frac{-(2t_a - 1)\pi}{Q}} \right] - 1 \quad (10)$$

Na abertura automática, imediatamente após a energização ou religamento sem sucesso de uma linha de transmissão compensada, os pólos do disjuntor, em uma ou mais fases, podem tentar interromper a corrente com elevada componente CC e, dependendo do valor da corrente no instante da separação dos contatos e do tempo de retardo do zero, podem ocorrer solicitações severas no disjuntor.

Os disjuntores modernos com meio de extinção a SF_6 , adequados para a manobra de reatores com o mínimo de sobretensão de corte de corrente, podem não ser capazes de interromper estas correntes transitórias, tendo como resultado um prolongamento do tempo de arco com a degradação excessiva de componentes das câmaras de extinção ou até a explosão do disjuntor. O prolongamento do arco também pode causar uma redução da suportabilidade dielétrica entre contatos, causando múltiplas reignições e reacendimentos do arco até que ocorra

uma possível explosão das câmaras. As referências (3), (6) e (7) reportam alguns casos práticos de falhas de disjuntores à SF₆ na tentativa de interrupção de correntes transitórias com zeros atrasados.

3.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ANALISADO

A Figura 3 apresenta um diagrama eletrogeográfico com a configuração atual e a prevista no horizonte 2023, para as áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste e um diagrama unifilar das linhas de transmissão Sobral III – Pecém II – Fortaleza II.

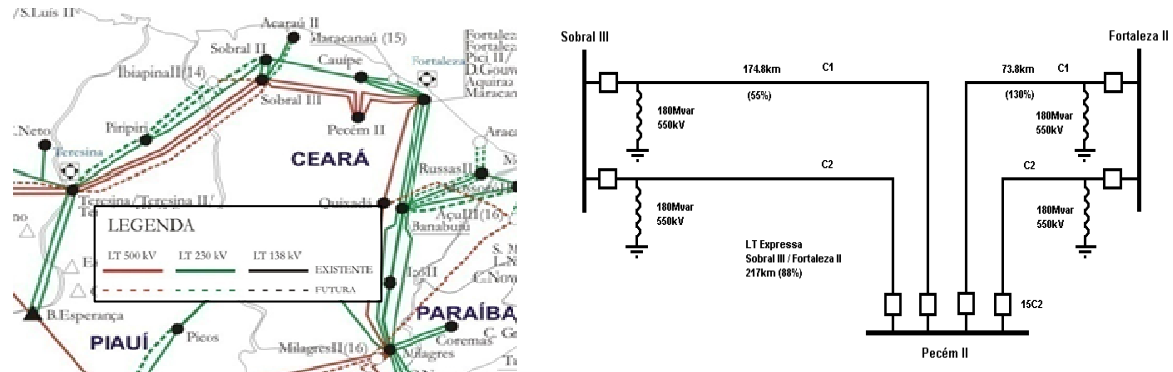


FIGURA 3 – Linhas de transmissão 500kV Sobral III-Pecém II-Fortaleza II

Antes da entrada em operação da subestação Pecém II, as linhas de transmissão Sobral III - Fortaleza II operavam expressas com reatores de linha 550kV/180Mvar nos terminais de Fortaleza II e Sobral III, levando a um grau de compensação 88%. Os reatores de linha dos circuitos C2 e C1 operam com o neutro diretamente aterrado (X0/X1=1) e aterrado através de reator de neutro (X0/X1=1,8), respectivamente.

Para a integração da subestação Pecém II 500/230kV ao sistema de transmissão, viabilizando a conexão de geradores térmicos e parques eólicos de grande porte, uma alternativa analisada na fase de planejamento da expansão foi o seccionamento das linhas de transmissão Sobral III – Fortaleza II C1 e C2. Esta alternativa foi selecionada e os novos trechos Sobral III – Pecém II e Pecém II – Fortaleza II passaram a operar com graus de compensação 55% e 130%, respectivamente. Considerando o pequeno comprimento dos trechos Pecém II – Fortaleza II, na fase de planejamento também foi avaliada a possibilidade de transferir os reatores de linha dos terminais Fortaleza II para os terminais Pecém II dos trechos Sobral III – Pecém II, mas esta alternativa foi descartada por razões de custo/benefício. Com a transferência dos reatores, os trechos Sobral III – Pecém II passariam a operar com grau de compensação 109%.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de tempo de retardo e relação I_{DC}/I_{AC} calculados para alguns valores de grau de compensação, considerando um fator de qualidade igual a 100. Nesta Tabela também são indicados os valores de corrente mínima (I_a) para um tempo de abertura igual a 3 ciclos, após o fechamento do disjuntor.

TABELA 1

k_{sh} (%)	I_{DC}/I_{AC}	$I_a/(I_{CV_m})$ (3 ciclos)	t_d (ciclos)
50	1,00	0,00	0,00
55	1,22	0,02	3,19
80	4,00	0,48	22,06
88	7,33	0,63	31,71
109	12,11	1,02	39,70
130	4,33	1,41	23,34

Para a linha de transmissão Pecém II – Fortaleza II, o valor da corrente da linha em vazio sem compensação (I_{CV_m}) é igual a 187A de crista. Para um grau de compensação 130%, de acordo com a Tabela 1, a corrente I_a pode atingir aproximadamente 240A em 3 ciclos, o que representa um valor muito elevado para ser interrompido através de um “corte de corrente”.

4.0 - SIMULAÇÕES DIGITAIS EM ATP

Para avaliar os riscos de ocorrência de zeros atrasados nos disjuntores, utilizados para a manobra das linhas de transmissão 500kV do eixo Sobral III – Pecém II - Fortaleza II, apresentado na Figura 3, foram realizadas simulações digitais utilizando o ATP (8) para manobras de energização e religamento de linhas em vazio, com e

sem a aplicação de curtos-circuitos monofásicos, com representação detalhada do sistema de transmissão na área de interesse através de uma modelagem adequada para estudos de surtos de manobra.

Para cada condição foram simuladas manobras com tempos de fechamento estatísticos considerando uma dispersão entre pólos máxima de 4ms, com monitoração das correntes no disjuntor manobrado e suas integrais, de forma a permitir a seleção dos instantes de fechamento dos pólos que geram os maiores valores de componente contínua.

4.1 Energização de linhas em vazio

A Figura 4-(a) mostra as formas de onda das correntes nos três pólos do disjuntor do terminal Pecém II, para a manobra de energização da linha de transmissão Fortaleza II/Pecém II C2, em vazio sobre Pecém II, sem curto-circuito e sem a presença do resistor de pré-inserção do disjuntor. Este caso corresponde à maior componente contínua de corrente através do disjuntor, com um grau de compensação 130% e com uma relação $X0/X1$ igual a 1,0 no reator. Ocorre uma elevada componente contínua na corrente da fase B (verde), superposta a uma pequena componente de 60Hz, de forma que a corrente resultante não atinge o zero durante todo o tempo de simulação, ou seja, o tempo de retardo é superior a 58 ciclos. Nas simulações não foi representado o efeito do arco elétrico entre contatos do disjuntor, mas na prática este efeito deve contribuir para aumentar o amortecimento e reduzir o tempo de retardo.

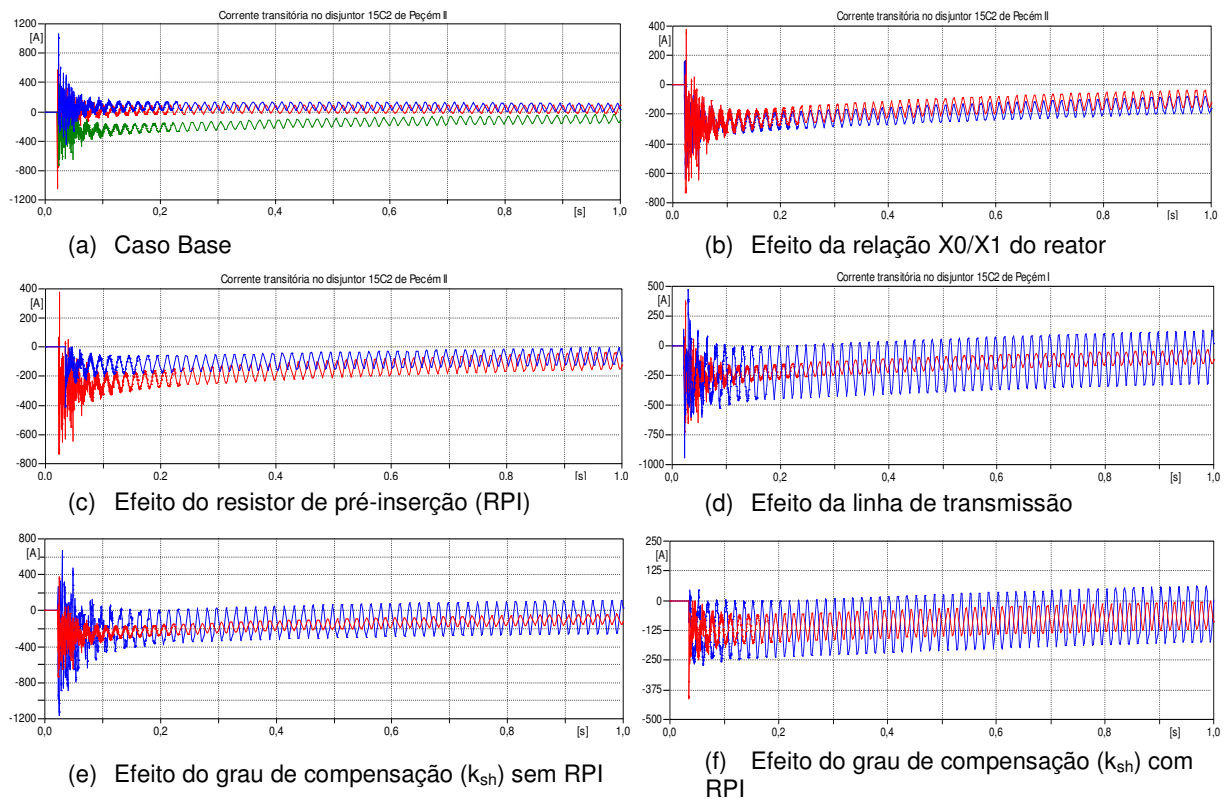


FIGURA 4 – Energização da LT Pecém II - Fortaleza II em vazio sobre Pecém II (Simulação)

A Figura 4-(b) mostra a mesma forma de onda da corrente transitória na fase B (vermelha), e a mesma corrente considerando um reator de 550kV/180Mvar com relação $X0/X1$ igual a 1,8 (azul). Este resultado mostra que, para esta condição, a presença do reator de neutro reduz o amortecimento da componente contínua da corrente, aumentando o tempo de retardo do primeiro zero de corrente.

A Figura 4-(c) mostra a mesma forma de onda da corrente transitória na fase B (vermelha), e a mesma corrente com resistor de pré-inserção de 423 Ω no disjuntor (azul). Este resultado mostra o efeito benéfico da presença do resistor de pré-inserção no sentido de reduzir a componente contínua da corrente, diminuindo o tempo de retardo do primeiro zero. Este valor do resistor foi otimizado para reduzir as sobretensões transitórias geradas nas manobras de energização e religamento da linha mas melhores resultados quanto aos zeros atrasados podem ser obtidos com outros valores de resistor.

A Figura 4-(d) mostra o pior caso de corrente transitória aperiódica para as linhas de transmissão Pecém II - Fortaleza II C2 ($k_{sh} = 1,30$) e Sobral III - Pecém II C2 ($k_{sh} = 0,55$). Na linha de transmissão Sobral III - Pecém II C2 (azul) praticamente não se observa o efeito de zeros atrasados.

Com o objetivo de avaliar o limite do grau de compensação para evitar a ocorrência de zeros atrasados, com e sem a presença do resistor de pré-inserção (RPI) de $423\ \Omega$ nos disjuntores da subestação Pecém II, foram realizadas simulações de energização da linha de transmissão Pecém II – Fortaleza II C2, em vazio sobre Pecém II. O grau de compensação da linha manobrada foi alterado através da variação do comprimento da linha, mantendo o mesmo reator de linha em Fortaleza II.

A Figura 4-(e) mostra as formas de onda das correntes calculadas, com grau de compensação original de 130% (vermelho) e 60% (azul). Para a linha de transmissão analisada, sem a presença do resistor de pré-inserção, só ocorrem zeros atrasados com um grau de compensação acima de 60%.

A Figura 4-(f) mostra as formas de onda das correntes calculadas na fase B, com grau de compensação original de 130% (vermelho) e 70% (azul). Para a linha de transmissão analisada, com a presença do resistor de pré-inserção, só ocorrem zeros atrasados com um grau de compensação acima de 70%. A presença do resistor de pré-inserção permite a utilização de um grau de compensação mais elevado sem riscos de zeros atrasados.

Como o aparecimento de correntes com zeros atrasados depende dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor com relação à onda de tensão, uma possível alternativa para mitigar o fenômeno é a aplicação de disjuntores com chaveamento controlado. Entretanto, é importante analisar cuidadosamente esta alternativa, caso a caso, uma vez que para minimizar a componente contínua é necessário que os fechamentos dos pólos ocorram nos respectivos instantes de máximo de tensão, o que levaria a uma maximização das sobretensões transitórias.

Os resultados das simulações realizadas mostram que os riscos associados aos zeros atrasados dependem de alguns fatores, tais como: instante de energização com relação à onda de tensão (a energização no zero da tensão produz a máxima componente contínua), grau de compensação da linha de transmissão (k_{sh}), relação X/R do reator e do sistema, impedância de sequência zero do reator e valor do resistor de pré-inserção.

4.2 Efeitos de curtos-circuitos

Durante as simulações foi observado que a simples aplicação de curtos-circuitos monofásicos pode gerar correntes transitórias com zeros atrasados através dos disjuntores de linha, nos pólos correspondentes às fases sãs. A componente contínua (CC) é decorrente da descarga dos reatores sobre o defeito e a sua amplitude depende da quantidade de reatores em derivação presentes nas subestações próximas. A Figura 5 mostra as correntes transitórias calculadas no disjuntor da linha de transmissão Pecém II - Fortaleza II C2, no terminal Fortaleza II, para um curto-circuito monofásico próximo desta subestação, no instante do zero da tensão da fase A. Neste caso, o tempo de retardo do zero na corrente da fase B é cerca de 8 ciclos de 60 Hz.

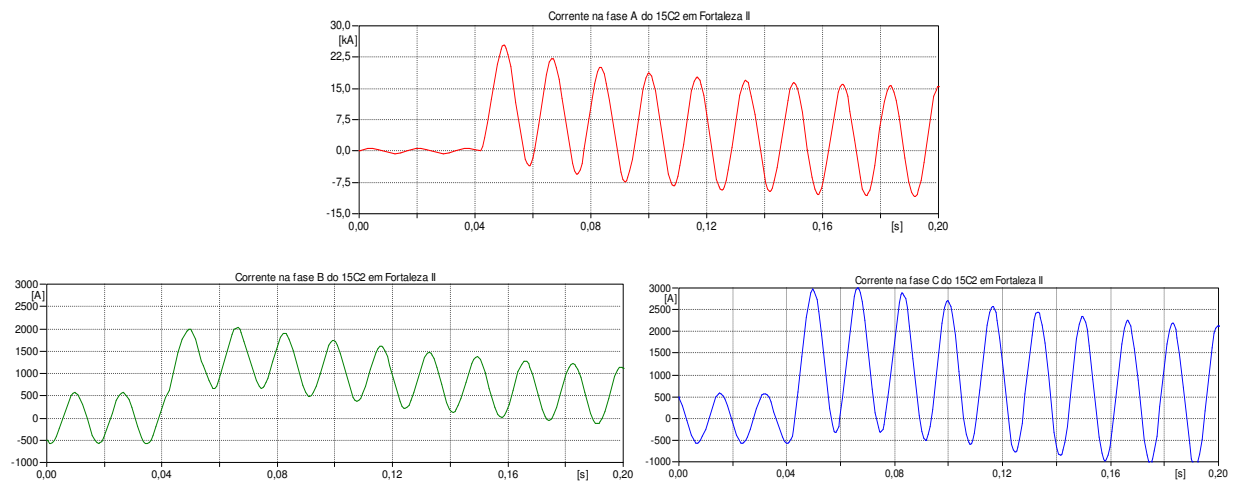


FIGURA 5 – Curto-circuito monofásico próximo de Fortaleza II (Simulação)

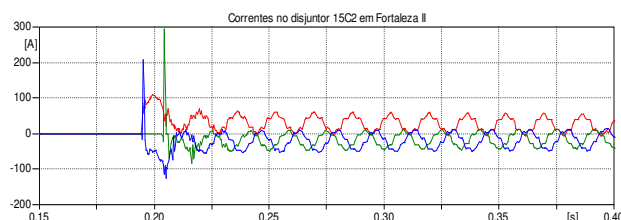
O valor máximo da componente contínua gerada nas correntes das fases sãs pela aplicação de curtos-circuitos monofásicos é superior ao valor máximo da componente contínua gerada pelas manobras de energização e religamento tripolar da linha em vazio, sem curto-circuito. Entretanto, observa-se que o tempo de retardo do zero é inferior ao tempo de retardo máximo gerado pelas manobras de energização e religamento.

Pelos resultados obtidos nas simulações verifica-se que a ocorrência de zeros atrasados nas correntes transitórias das fases sãs, na aplicação de curtos-circuitos monofásicos, depende dos seguintes fatores:

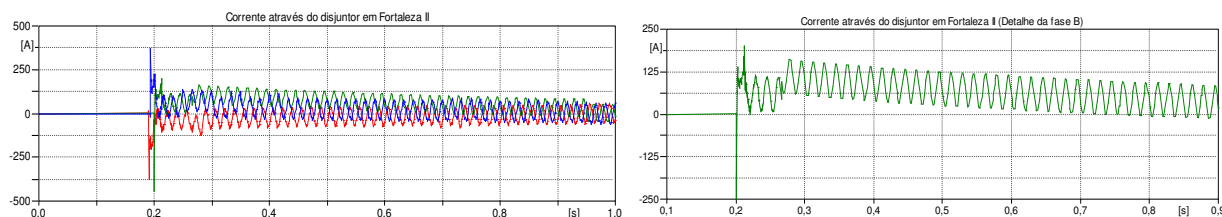
- Instante da aplicação do curto-circuito com relação à onda de tensão. Quando o curto-circuito ocorre próximo à crista da tensão, não ocorrem zeros atrasados;
- Localização do curto-circuito. Para o eixo Sobral III – Pecém II - Fortaleza II só ocorrem zeros atrasados significativos (com tempo de retardo maior que 03 ciclos) para curtos-circuitos próximos de Fortaleza II e Sobral III;
- Valor da corrente de carga no instante da aplicação do curto-circuito. Quanto mais elevado o carregamento da linha de transmissão menor o efeito da componente contínua (CC) e, portanto, menor o tempo de retardo do zero.
- Potência instalada de reatores em derivação, de barra e de linha, nas subestações próximas.

5.0 - REGISTROS DE MANOBRAS EM CAMPO

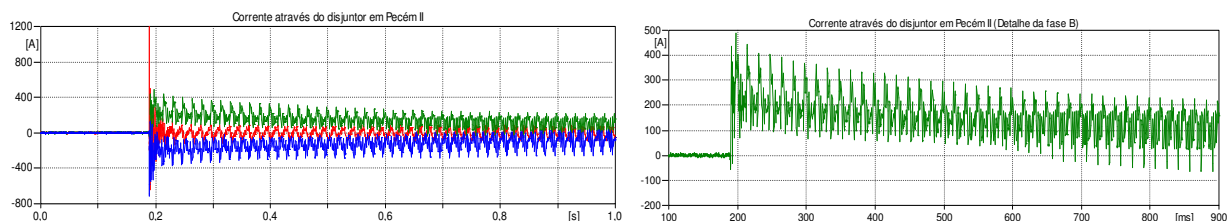
Para verificar a validade dos resultados das simulações realizadas, foram analisados registros oscilográficos de manobras reais nas linhas de transmissão 500kV do eixo Sobral III – Pecém II - Fortaleza II, apresentado na Figura 3. A Figura 6-(a) mostra as formas de onda das correntes nos três pólos do disjuntor do terminal Fortaleza II para a energização em vazio da linha de transmissão Pecém II - Fortaleza II C2 no dia 06/10/2013 às 14h30min, com o reator de linha conectado. Neste registro pode ser observada a presença de uma componente contínua (CC) superposta à componente de 60Hz, mas não ocorrem zeros atrasados. O disjuntor do terminal Fortaleza II possui quatro câmaras por pólo e é equipado com resistor de pré-inserção de 400 Ω , o que contribui para amortecer a componente contínua.



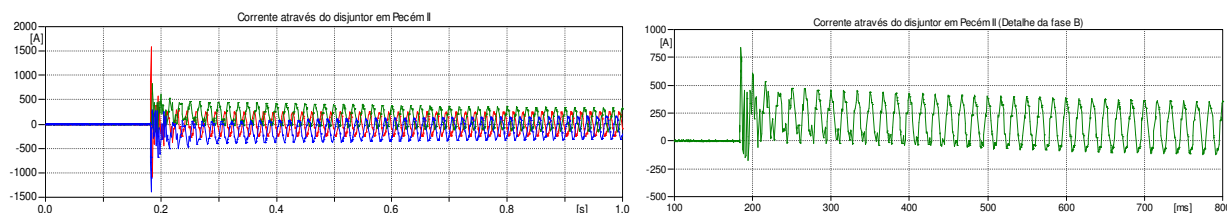
(a) Energização Fortaleza II - Pecém II dia 06/10/2013



(b) Energização Fortaleza II/Pecém II dia 07/12/2013



(c) Energização Fortaleza II - Pecém II dia 08/12/2013



(d) Energização Sobral III - Pecém II dia 15/12/2013

FIGURA 6 – Manobras reais de energização de LT em vazio (Medições)

No dia 07/12/2013 às 08h28min a linha de transmissão Pecém II - Fortaleza II C2 foi novamente energizada em vazio sobre Fortaleza II, com o reator de linha conectado. A Figura 6-(b) mostra os registros oscilográficos das correntes no disjuntor do terminal Fortaleza II. Nesta manobra, apesar do resistor de pré-inserção, verifica-se a

ocorrência de zeros atrasados na corrente da fase B (verde). Após a energização, a corrente da fase B permanece 0,51s sem passagem pelo zero, entre os instantes 0,22s e 0,73s.

Às 11h25min do dia 08/12/2013 a linha de transmissão Pecém II - Fortaleza II C2 foi energizada em vazio sobre Pecém II, com o reator de linha conectado e simultaneamente com um autotransformador 500/230kV-1200MVA de Pecém II, também em vazio. A Figura 6-(c) mostra os registros oscilográficos das correntes no disjuntor de linha do terminal Pecém II. O disjuntor utilizado na manobra não é equipado com resistor de pré-inserção. Nas correntes das fases B (verde) e C (azul) verifica-se a ocorrência de zeros atrasados. Após a energização, a corrente da fase B permanece 0,46s sem passagem pelo zero, entre os instantes 0,19s e 0,65s.

No dia 15/12/2013 às 10h01min a linha de transmissão Sobral III - Pecém II foi energizada em vazio sobre Pecém II com o reator de linha conectado, através de um disjuntor sem resistor de pré-inserção. A Figura 6-(d) mostra registros oscilográficos das correntes no disjuntor de linha no terminal Pecém II. Neste caso não ocorre o efeito de zeros atrasados.

Os registros oscilográficos obtidos nas manobras da linha de transmissão Pecém II – Fortaleza II C2, apresentados na Figura 6, confirmam os resultados das simulações realizadas quanto aos riscos de interrupção de correntes transitórias com zeros atrasados pelos disjuntores das linhas de transmissão do trecho Pecém II – Fortaleza II.

6.0 - CONCLUSÃO

Nas linhas de transmissão 500kV do trecho Pecém II - Fortaleza II pode ocorrer o fenômeno de zeros atrasados nos disjuntores de linha, durante as manobras de energização e religamento automático, iniciando por Pecém II ou por Fortaleza II, em função do grau de compensação (130%) através de reatores em derivação. O fenômeno depende das características do sistema e é afetado pela presença de curtos-circuitos na linha, não está relacionado com o desempenho do disjuntor e não é coberto pelas Normas Técnicas de Especificação e Ensaio de disjuntores de alta tensão. A tentativa de interrupção de correntes com zeros atrasados com disjuntores a SF₆ modernos pode causar degradação excessiva dos componentes das câmaras principais, múltiplos reacendimentos do arco e até explosão do disjuntor, representando um risco não previsto pelos Agentes de transmissão.

Para as linhas de transmissão Pecém II - Fortaleza II, sem e com a presença dos resistores de pré-inserção nos disjuntores de linha, só ocorrem zeros atrasados com um grau de compensação acima de 60% e 70%, respectivamente. A presença do resistor de pré-inserção, mesmo quando dimensionado para reduzir as sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linha em vazio, permite a utilização de um grau de compensação mais elevado, sem zeros atrasados. A solução indicada para o caso analisado foi a transferência dos reatores de linha do trecho Pecém II – Fortaleza II, no terminal Fortaleza II, para a barra desta subestação.

Considerando os riscos associados e os potenciais impactos para os Agentes de transmissão, recomenda-se que o fenômeno de zeros atrasados seja considerado já na fase de planejamento da expansão da Rede Básica, quando da definição do grau de compensação das linhas, no Edital do Leilão e na fase de Projeto Básico durante os estudos para a definição das características técnicas e especificações básicas dos equipamentos componentes da nova instalação.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SILVA, F. F., et ali, Methods to Minimize Zero-Missing Phenomenon, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 25, No. 4, October 2010.
- (2) OWEN, M., Overvoltages During Line Dropping of Compensated Lines. CIGRE 2012 SESSION.
- (3) KACHESOV, V. E., et ali, Requirements for Switching Algorithms of EHV Shunt Compensated OHL by SF₆ Circuit-Breakers, IPST 2011.
- (4) IEC 62271-100, High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers, 2008.
- (5) CARVALHO, A. V., FREIRE, A. R. F., OLIVEIRA, H. M., Transient Interaction Between Coupling Capacitors Voltage Transformers and Transmission Lines, IEEE PESGM 2009.
- (6) NAUMKIN, I., et ali, Simulation of the 500kV SF₆ Circuit Breaker Cutoff Process During the Unsuccessful Three-Phase Autoreclosing, IPST 2011.

(7) NAUMKIN, I., et ali, Methods of performance assurance for SF6 circuit-breakers at switchings of compensated 500-1150kV overhead Power lines, IPST 2013.

(8) LEUVEN EMTP CENTER, "ATP - Alternative Transient Program - Rule Book", Herverlee, Belgium, 1987.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Antonio Roseval F. Freire, nascido em Recife-PE em 1964, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1985, obteve o grau de Msc pela COPPE/UFRJ em 1991 e foi pós-graduado em Engenharia da Qualidade pela UFPE em 1995. Trabalha na Chesf desde 1985, com experiências nas áreas de especificação, ensaios e análise de desempenho de equipamentos de subestações e compensadores estáticos, planejamento da operação e da expansão, análise de ocorrências e estudos elétricos de sistemas de potência. É membro individual do CIGRÉ e do IEEE.



Fernando Rodrigues Alves, Nascido em Campina Grande-PB em 1951, formou-se em engenharia elétrica pela UFPB, em 1978, foi pós-graduado em Análise de Sistemas de Potência, em 1983, pela EFEI/MG, fez MBA – Gestão de Negócios em 2001 pela UFPE e obteve grau de MSc em Engenharia Elétrica, pela UNIFEI/MG em 2006. Foi professor da cadeira de Subestações do Curso de Engenharia Elétrica da UFPE de 2002 até 2004. Trabalha na Chesf, na área de Estudos de Sistemas de Transmissão desde 1978, com experiência nas áreas de planejamento, estudos de sobretensões, coordenação de isolamento e especificação de equipamentos. Atualmente exerce a função de Gerente do Departamento de Estudos de Sistemas de Transmissão.



André Luiz P. Cruz, nascido em Olinda-PE em 1977, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE em 2001, pós-graduado em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica pela UNIFEI/MG em 2007 e é aluno de mestrado da UFCG/PB. Trabalha na Chesf desde 2002, com experiências em estudos de transitórios eletromagnéticos e coordenação de isolamentos, especificação de equipamentos de alta tensão, curto-circuito e estudos elétricos de linhas de transmissão. Atualmente exerce a função de gerente da Divisão de Estudos e Tecnologia de Alta Tensão – DEAT. É membro individual do CIGRÉ e do IEEE.