



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISES DE OCORRÊNCIA DE ZEROS ATRASADOS DURANTE MANOBRAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO 500 KV DA REDE BÁSICA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - PROBLEMAS E SOLUÇÕES

**FERNANDO RODRIGUES ALVES(1); ANDRÉ LUIZ PEREIRA DA CRUZ(1); FABIANA DA SILVA LEAL(1)
FELIPE CORRÊA DE ANDRADE(1); FERNANDO EDIER F. FREITAS(1); FRANCISCO RODRIGUES SABINO
JUNIOR(1); GUSTAVO HENRIQUE SANTOS VIEIRA DE MELO(1)**

COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SAO FRANCISCO

(1)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma síntese das análises do fenômeno de zeros atrasados nos disjuntores das linhas de transmissão 500kV Recife II – Suape II, 05L7 e Angelim II – Garanhuns II, 05L5, sobrecompensadas, da rede básica da Chesf, realizadas por meio do programa Alternative Transients Program – ATP [1]. São analisadas manobras de energização, religamento automático e aplicação de faltas monofásicas nas linhas, e medidas para mitigar as não conformidades decorrentes deste fenômeno, sem prejuízo para o SIN ou para os disjuntores a elas associados, são propostas. O trabalho prioriza soluções que evitem, sempre que possível, remanejamento de reatores ou troca dos disjuntores das linhas em estudo.

PALAVRAS-CHAVE

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

1.0 INTRODUÇÃO

A ocorrência de zeros atrasados nas correntes passantes pelos disjuntores, durante manobras de linhas de transmissão, é causada pelos elevados graus de compensação em derivação, maiores que 50%, e é consequência da componente contínua (CC) presente nessas correntes [2], [3], [4]. Na Chesf, esse fenômeno foi primeiramente observado durante manobras de abertura da LT 500 kV Pecém II – Fortaleza II. À época, simulações de transitórios eletromagnéticos foram realizadas com o intuito de investigar este fenômeno e identificar suas consequências para o sistema. Os resultados das análises, que se mostraram bastante aderentes aos registros de oscilografia da proteção, foram consolidados em [5] e aprofundados em [6]. Esses estudos, bem como uma análise teórica do problema, estão sintetizados em [7].

Mais recentemente, estudos adicionais foram desenvolvidos pela Chesf para as LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, com grau de compensação de 176% [8] e Angelim II – Garanhuns II, 05L5, com grau de compensação de 962% [9]. A elevada sobrecompensação destas linhas resultou do seccionamento de linhas existentes em operação, antes com grau de compensação usual, para inclusão de novas subestações planejadas pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE após estudos de expansão do SIN.

A nova condição de operação destas linhas, com elevado grau de compensação, requer uma avaliação criteriosa das correntes transitórias geradas nas manobras de energização, religamento automático, aplicação e eliminação de faltas nas linhas, com ênfase no fenômeno de zeros atrasados. A interrupção destas correntes transitórias pode causar solicitações expressivas nos disjuntores de linha, que não são cobertas pelas Normas Técnicas de Especificação e Ensaio de Disjuntores de Alta Tensão [10].

2.0 CONCEITOS BÁSICOS

Os conceitos básicos do fenômeno de zeros atrasados estão reportados de forma bastante detalhada na referência [4]. Para um melhor entendimento do assunto abordado nesse artigo, apresenta-se a seguir uma breve descrição dos principais aspectos envolvidos nesse fenômeno.

A Figura 1 mostra o circuito equivalente simplificado utilizado para a análise conceitual do problema de zeros atrasados. Neste circuito, C representa a capacitância total de sequência positiva da linha de transmissão, L representa a indutância equivalente de sequência positiva dos reatores da linha e a resistência 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.

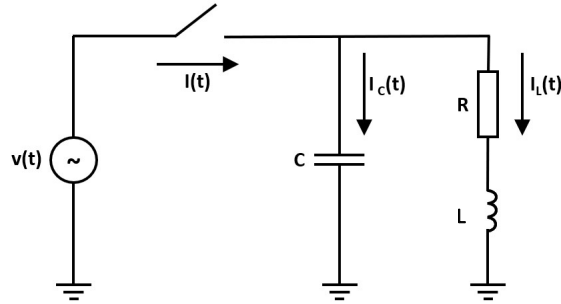


FIGURA 1 – Circuito equivalente simplificado

A corrente transitória $I(t)$ através do disjuntor pode ser determinada pela equação (1), onde V_m é a amplitude da tensão $v(t)$, k_{sh} é o grau de compensação da linha de transmissão e Q é o fator de qualidade do circuito, definidos nas equações (2) e (3), respectivamente.

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

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

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (3)$$

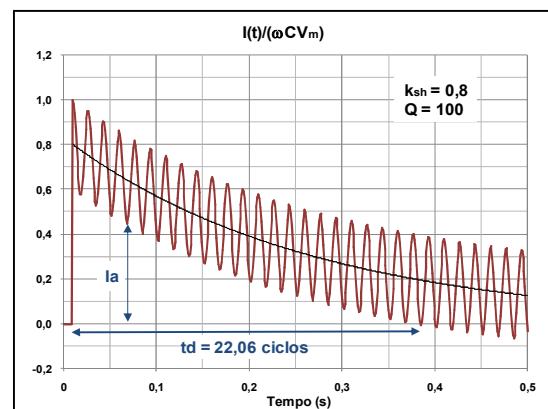
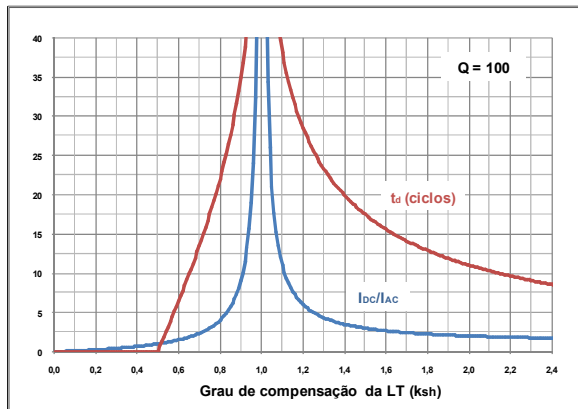
Dentro de aproximações consideradas, quando a componente contínua (I_{DC}) da corrente é maior ou igual ao valor de crista da componente alternada (I_{AC}), poderá ocorrer o fenômeno de zeros atrasados. Pela equação (4) é possível calcular a relação entre as duas componentes. Para um grau de compensação menor que 0,5, a relação é menor que 1, ou seja, a componente contínua é inferior ao valor de crista da componente alternada.

$$\frac{I_{DC}}{I_{AC}} = \frac{k_{sh}}{|1 - k_{sh}|} \quad (4)$$

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

$$t_d = \frac{-Q}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{|1 - k_{sh}|}{k_{sh}} \right] \quad (5)$$

A Figura 2-(a) mostra os valores da relação I_{DC}/I_{AC} e do tempo de retardo t_d , calculados pelas equações (4) e (5), 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 (1), 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)

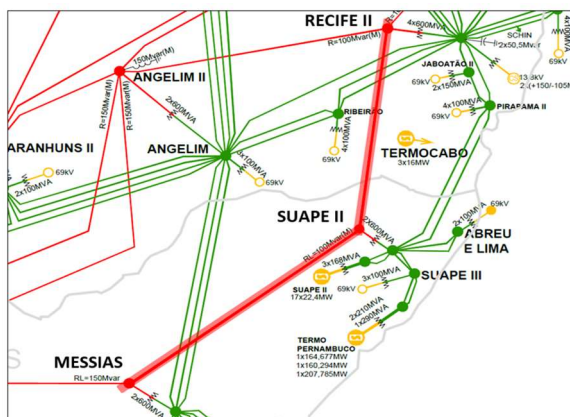
(b)

FIGURA 2 – Ocorrência de zeros atrasados

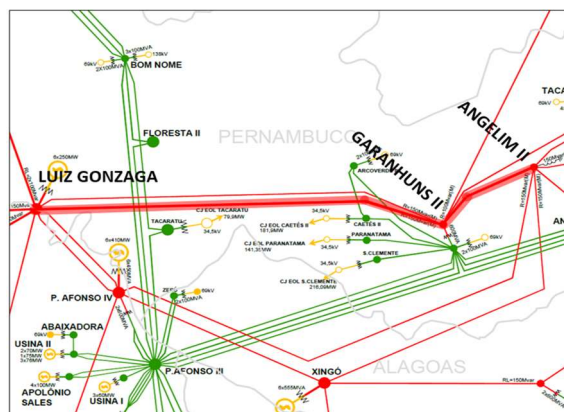
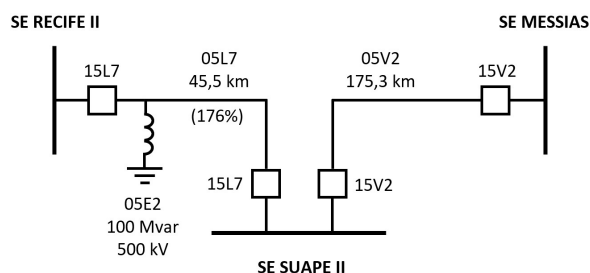
Na abertura automática, imediatamente após a energização ou religamento sem sucesso de uma linha de transmissão compensada, os pólos do disjuntor, em uma ou mais fases, podem tentar interromper a corrente com elevada componente CC e, dependendo do valor da corrente no instante da separação dos contatos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

3.0 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ANALISADO

As figuras 3-(a) e 3-(b) ilustram a localização e a configuração de seccionamento das LT 500 kV Messias – Recife II na SE Suape II e Luiz Gonzaga – Angelim II na SE Garanhuns II com indicação dos comprimentos resultantes destes seccionamentos, assim como os graus de compensação dos trechos de linha mais curtos, analisados neste artigo.



(a)



Fonte: ONS.

(b)

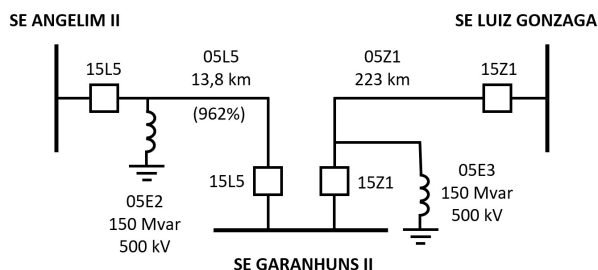


FIGURA 3 – Linhas de transmissão 500kV Recife II – Suape II (a) e Angelim II – Garanhuns II (b)

4.0 SIMULAÇÕES DIGITAIS EM ATP

Para avaliar os riscos de ocorrência de zeros atrasados nos disjuntores das linhas de transmissão 500kV Recife II – Suape II, 05L7, e Angelim II – Garanhuns II, 05L5, mostradas na Figura 3, foram realizadas manobras de energização e de religamento tripolar das linhas, com e sem a aplicação de curtos-circuitos monofásicos, além de aplicação e eliminação de faltas, com representação detalhada do sistema de transmissão na área de interesse.

Para cada simulação, foram feitas manobras com tempos de fechamento estatístico considerando uma dispersão máxima entre pólos de 4 ms, 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 linha em vazio

4.1.1 LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, com grau de compensação de 176%

A Tabela 1 apresenta os principais resultados obtidos na manobra de energização da LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, a partir da SE Recife II. Observa-se que na energização da linha sem reator (casos EN01 a EN03), não ocorre retardo de tempo na passagem da corrente pelo zero no disjuntor do terminal de Recife II. Com a inserção do reator na linha, a passagem da corrente pelo zero neste disjuntor passa a ter retardo (casos EN04 a EN06), comprovando a influência deste reator na ocorrência dos atrasos, conforme ilustrado nas figuras 4 e 5.

TABELA 1 - Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de energização em vazio da LT 500 kV Recife II – Suape II, pela SE Recife II

| Caso | Reator da LT em RCD | Resistor de aterramento (Ω) | Fator de qualidade do reator | Resistor de pré-inserção (Ω) | Local do defeito fase-terra | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE RCD (ms) |
|------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---|
| EN01 | Sem | - | - | - | - | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN02 | Sem | - | - | - | Meio da LT | |
| EN03 | Sem | - | - | - | SUD | |
| EN04 | Com | 150 | ∞ | - | - | Sem cruzamento pelo zero |
| EN05 | Com | 150 | 300 | 400 | - | 484,0 |
| EN06 | Com | 150 | 300 | 400 | RCD | 317,0 |
| EN07 | Com | 150 | 300 | 400 | Meio da LT | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN08 | Com | 150 | 300 | 400 | SUD | |

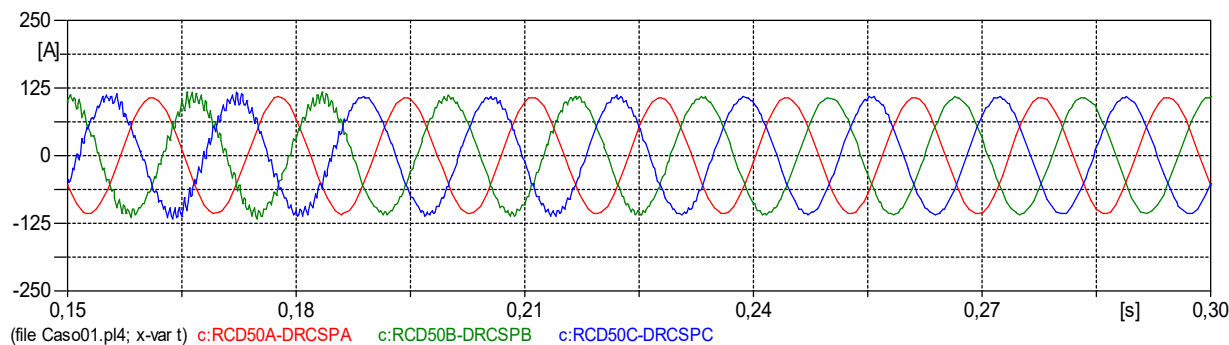


FIGURA 4: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, sem reator, caso EN01

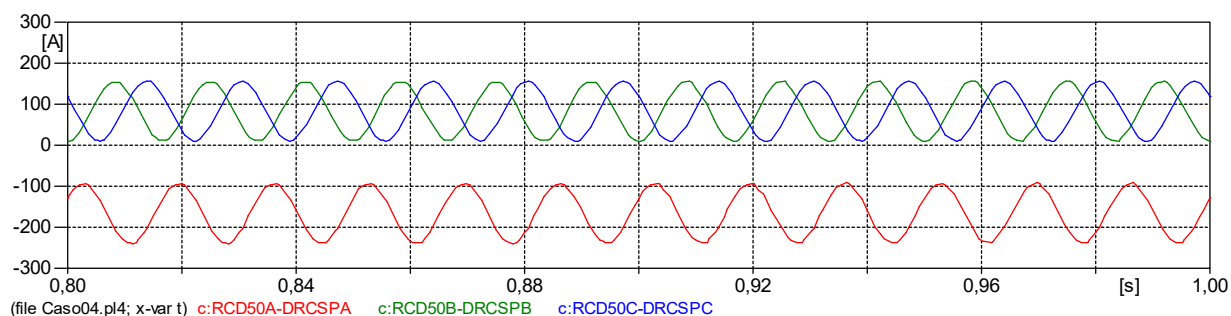


FIGURA 5: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, com reator, caso EN04

Para avaliar o comportamento das correntes passantes pelos disjuntores da LT 500 kV Recife II – Suape II, com reator, caso esses sejam comandados, intempestivamente, a abrir o circuito logo após a sua energização, foram simulados os piores casos de energização pela SE Recife II (EN05 e EN06), com resistor de pré-inserção (RPI), considerando a abertura tripolar dos disjuntores em 0,1 segundos de simulação, 4 ciclos após a energização. Os resultados dessas simulações estão apresentados nas figuras 6 e 7.

Na Figura 6, caso de energização sem falta aplicada, observa-se que a fase B (verde) sempre passa pelo zero, sendo esse o primeiro polo do disjuntor a abrir. Ao abrir a fase B, as outras duas fases, que não apresentavam passagem pelo zero, são deslocadas para esse ponto. Após a abertura da fase B, o maior tempo de retardo na passagem pelo zero observado nas fases A e C foi de 2 ciclos, tempo este compatível com a capacidade de abertura do disjuntor.

Para o caso de energização com falta monofásica aplicada na fase A no terminal da SE Recife II (EN06), Figura 7, observa-se que as fases sãs (fases B e C) logo passam pelo zero após a abertura desta fase (0,1 segundos). Portanto, apesar de haver o retardo na passagem da corrente pelo zero, isto não constitui um problema para abertura da linha após sua energização com ou sem falta aplicada.

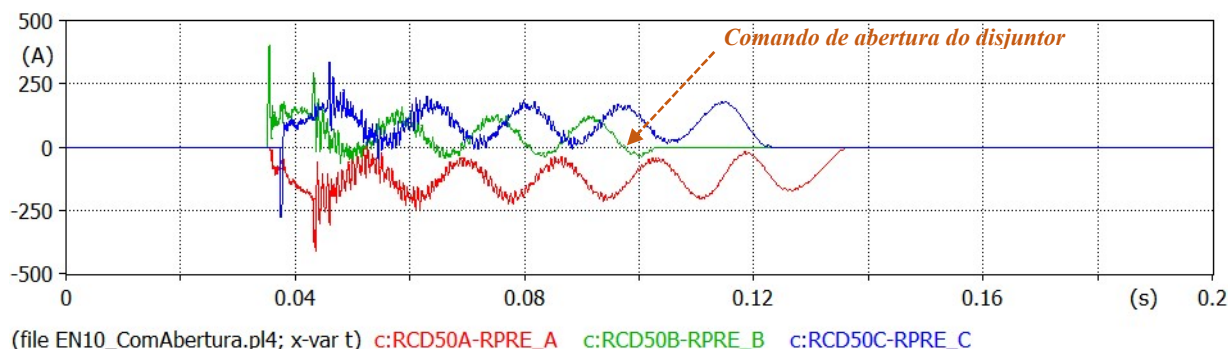


FIGURA 6: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, caso EN05, sem defeito, considerando a abertura tripolar do disjuntor 4 ciclos após a energização do circuito

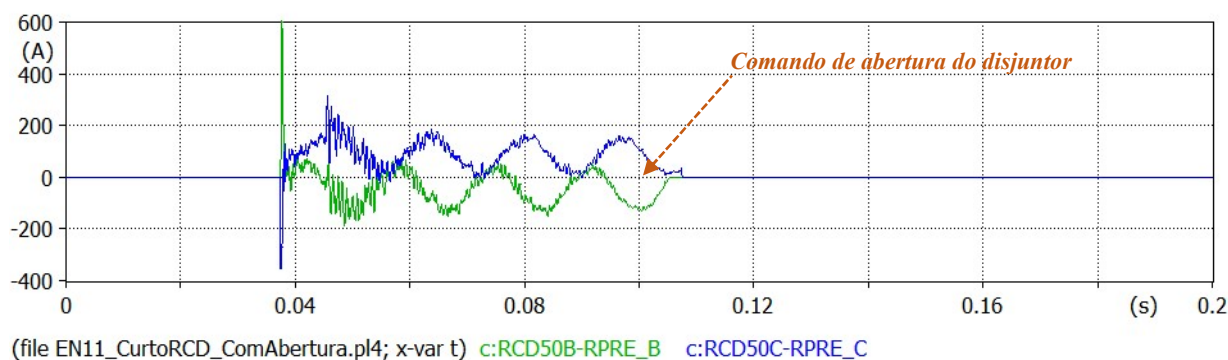


FIGURA 7: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, caso EN06, com defeito em Recife II, considerando a abertura tripolar do disjuntor 4 ciclos após a energização do circuito

A Tabela 2 resume os resultados das análises da energização da LT 500 kV Recife II – Suape II, a partir de Suape II, com e sem reator inserido na linha.

Os casos EN09 a EN11 mostram que na manobra de energização da linha por Suape II, sem reator, não ocorrem zeros atrasados nas correntes dos disjuntores deste circuito.

Com o reator conectado, a corrente no disjuntor do terminal de Suape II apresenta um retardo de 367 ms para a primeira passagem pelo zero durante a manobra de energização sem defeito (caso EN12).

Para este caso, foi investigado o comportamento das correntes passantes pelos disjuntores da LT 500 kV Recife II – Suape II, caso esses sejam comandados a realizar uma abertura tripolar de 4 ciclos após a energização do circuito. Os resultados desta simulação estão apresentados na Figura 8.

Assim como na energização por Recife II, durante a manobra por Suape II, a corrente em uma das fases (fase C em azul) sempre passa pelo zero, sendo este o primeiro polo do disjuntor a abrir. Ao abrir a fase C, as outras duas fases mostram comportamento diferente do que vinham apresentando anteriormente, passando pelo zero em, no máximo, 2 ciclos após a abertura desta fase. Portanto, de forma semelhante ao que se observa para a energização por Recife II, apesar de haver o fenômeno do retardo na passagem da corrente pelo zero, esse fato pode não constituir problema para o disjuntor na abertura da linha após energização.

TABELA 2 - Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de energização em vazio da LT 500 kV Recife II – Suape II, pela SE Suape II

| Caso | Reator da LT em RCD | Resistor de aterramento (W) | Fator de qualidade do reator | Resistor de pré-inserção (W) | Local do defeito fase-terra | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE SUD (ms) |
|------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| EN09 | Sem | - | - | - | - | |

| | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|------------|--------------------------------------|
| EN10 | Sem | - | - | - | Meio da LT | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN11 | Sem | - | - | - | RCD | |
| EN12 | Com | 150 | 300 | 400 | - | |
| EN13 | Com | 150 | 300 | 400 | SUD | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN14 | Com | 150 | 300 | 400 | Meio da LT | |
| EN15 | Com | 150 | 300 | 400 | RCD | |

Os casos EN13 a EN15 mostram que a manobra de energização com reator e com defeito aplicado no meio da linha ou nas suas extremidades não provoca atraso da passagem da corrente pelo zero nos seus disjuntores.

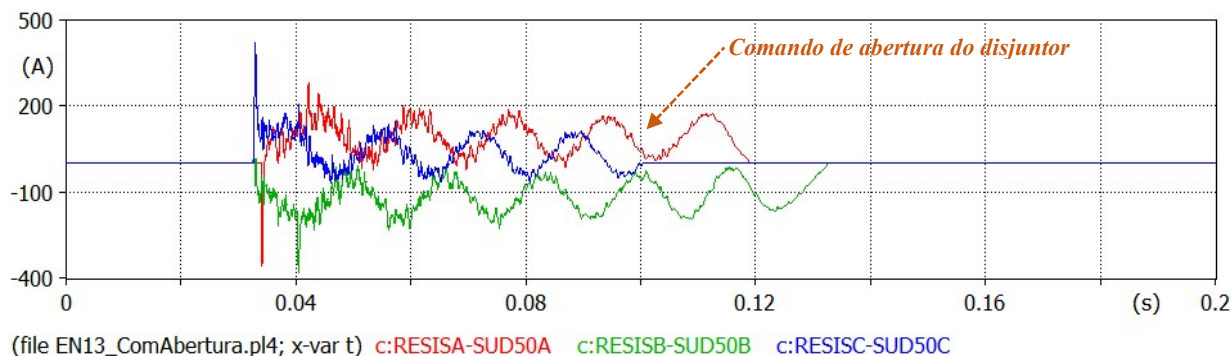


FIGURA 8: Correntes no disjuntor 15L7 do terminal Suape II, LT 500 kV Recife II – Suape II, caso EN12, considerando a abertura tripolar dos disjuntores 4 ciclos após a energização do circuito

4.1.2 LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, 05L5, com grau de compensação de 962%

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos principais resultados da manobra de energização da LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, 05L5, a partir da SE Angelim II.

Observa-se que na condição de energização sem ou com reator de linha, sem ou com defeito aplicado (casos EN01 a EN07), não ocorre retardo de tempo na passagem da corrente pelo zero. As mesmas constatações são verificadas quando se realiza a energização dessa linha pelo terminal de Garanhuns II, conforme pode ser verificado na Tabela 4. A Figura 9 ilustra o comportamento da corrente no disjuntor de Garanhuns II para o caso EN11.

TABELA 3 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de energização em vazio da LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, pela SE Angelim II

| Caso | Reator da LT em AGD | Resistor de aterramento (Ω) | Fator de qualidade do reator | Resistor de pré-inserção (Ω) | Local do defeito fase-terra | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE AGD (ms) |
|------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| EN01 | Sem | - | - | - | - | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN02 | Sem | - | - | - | Meio da LT | |
| EN03 | Sem | - | - | - | GRD | |
| EN04 | Com | 100 | 300 | 504 | - | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN05 | Com | 100 | 300 | 504 | AGD | |
| EN06 | Com | 100 | 300 | 504 | Meio da LT | |
| EN07 | Com | 100 | 300 | 504 | GRD | |

TABELA 4 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de energização em vazio da LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, pela SE Garanhuns II

| Caso | Reator da LT em AGD | Resistor de aterramento (Ω) | Fator de qualidade do reator | Resistor de pré-inserção (Ω) | Local do defeito fase-terra | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE GRD (ms) |
|------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| EN08 | Sem | - | - | - | - | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN09 | Sem | - | - | - | Meio da LT | |
| EN10 | Sem | - | - | - | AGD | |
| EN11 | Com | 100 | 300 | 450 | - | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| EN12 | Com | 100 | 300 | 450 | GRD | |
| EN13 | Com | 100 | 300 | 450 | Meio da LT | |
| EN14 | Com | 100 | 300 | 450 | AGD | |

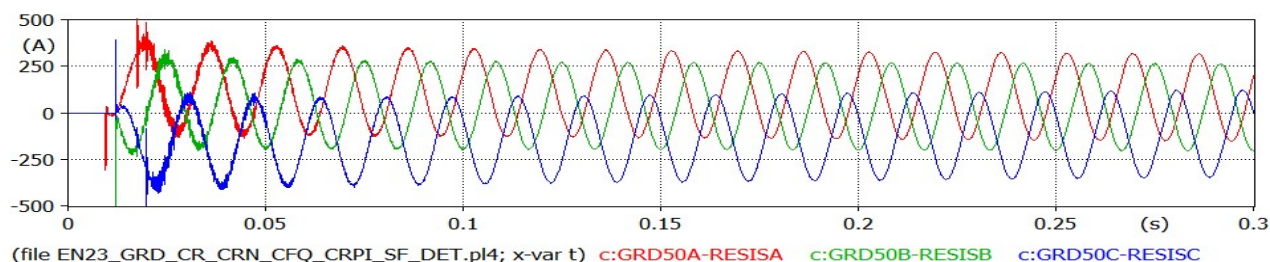


FIGURA 9: Correntes no disjuntor 15L5 da SE Garanhuns II, LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, caso EN11

Dessa forma, apesar do elevado grau de compensação da LT, 962%, não ocorre zero atrasado na energização desta linha. Este comportamento da corrente está coerente com o apresentado na Figura 2-(a) deste artigo.

4.2 Aplicação de curtos-circuitos nas LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, e Angelim II - Garanhuns II, 05L5

A ocorrência de zeros atrasados nas correntes transitórias das fases sãs, na aplicação de curtos-circuitos monofásicos, depende dos seguintes fatores: a) Localização do curto; b) Instante da aplicação do curto-circuito com relação à onda de tensão; c) 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 e menor o tempo de retardo do zero); d) Potência instalada de reatores em derivação de barra e de linha nas subestações próximas.

As tabelas 5 e 6 mostram os tempos máximos de retardo no cruzamento da corrente pelo zero nas LT 500 kV Recife II - Suape II, 05L7, e Angelim II – Garanhuns II, 05L5, durante a aplicação de defeito monofásico nos terminais ou no meio destas linhas. Para a LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, observa-se que na condição de fluxo máximo, correspondente à capacidade nominal da linha, não ocorre atraso na passagem da corrente pelo zero. Já na condição de fluxo mínimo, para defeito aplicado em Recife II, caso CC01 da Tabela 5, verifica-se um retardo de 332 ms neste terminal e 249 ms em Suape II.

Para faltas aplicadas na LT 500 kV Angelim II - Garanhuns II, 05L5, verifica-se que, na condição de fluxo máximo, correspondente à capacidade nominal da linha, não ocorre atraso na passagem da corrente pelo zero. Porém, na condição de fluxo mínimo para faltas aplicadas nos terminais da linha, ocorre atraso na passagem da corrente pelo zero nos disjuntores em ambos os terminais, Garanhuns II e Angelim II.

TABELA 5 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes após aplicação de defeito monofásico na LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7

| Caso | Local de aplicação do defeito fase-terra | Condição de ajuste de Fluxo | Máximo tempo de retardo do zero (ms) nos disjuntores da SE Recife II | Máximo tempo de retardo do zero (ms) nos disjuntores da SE Suape II |
|------|--|-----------------------------|--|---|
| CC01 | RCD | Mínimo | 332,0 | 249,0 |
| CC02 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC03 | Meio | Mínimo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC04 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC05 | SUD | Mínimo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC06 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |

TABELA 6 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes após aplicação de defeito na LT 500 kV Angelim - Garanhuns II, 05L5

| Caso | Local de aplicação do defeito fase-terra | Condição de ajuste de Fluxo | Máximo tempo de retardo do zero (ms) nos disjuntores da SE Garanhuns II | Máximo tempo de retardo do zero (ms) nos disjuntores da SE Angelim II |
|------|--|-----------------------------|---|---|
| CC07 | GRD | Mínimo | 156,0 | 840,0 |
| CC08 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC09 | Meio | Mínimo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |
| CC10 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |

| | | | | |
|------|-----|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CC11 | AGD | Mínimo | 100,0 | 134,0 |
| CC12 | | Máximo | Sem retardos no cruzamento pelo zero | Sem retardos no cruzamento pelo zero |

Em adição, foi investigado o comportamento das correntes durante a abertura tripolar, logo após um defeito fase-terra na linha, selecionando, para esta análise, o caso CC01 da LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, em condições de fluxo mínimo e com o reator de linha conectado. Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 10, onde se observa que após a abertura da fase A, que se encontra sob defeito monofásico, as correntes nas outras duas fases, com zero atrasado durante vários ciclos, passam pelo zero em, no máximo, 2 ciclos após a abertura da fase em curto.

Portanto, o retardo na passagem da corrente pelo zero nas fases sãs, pode não constituir um problema para o disjuntor caso este seja comandado a realizar a abertura tripolar da linha, uma vez que as correntes nas demais fases passam a apresentar zeros dentro da janela de tempo de interrupção desse disjuntor.

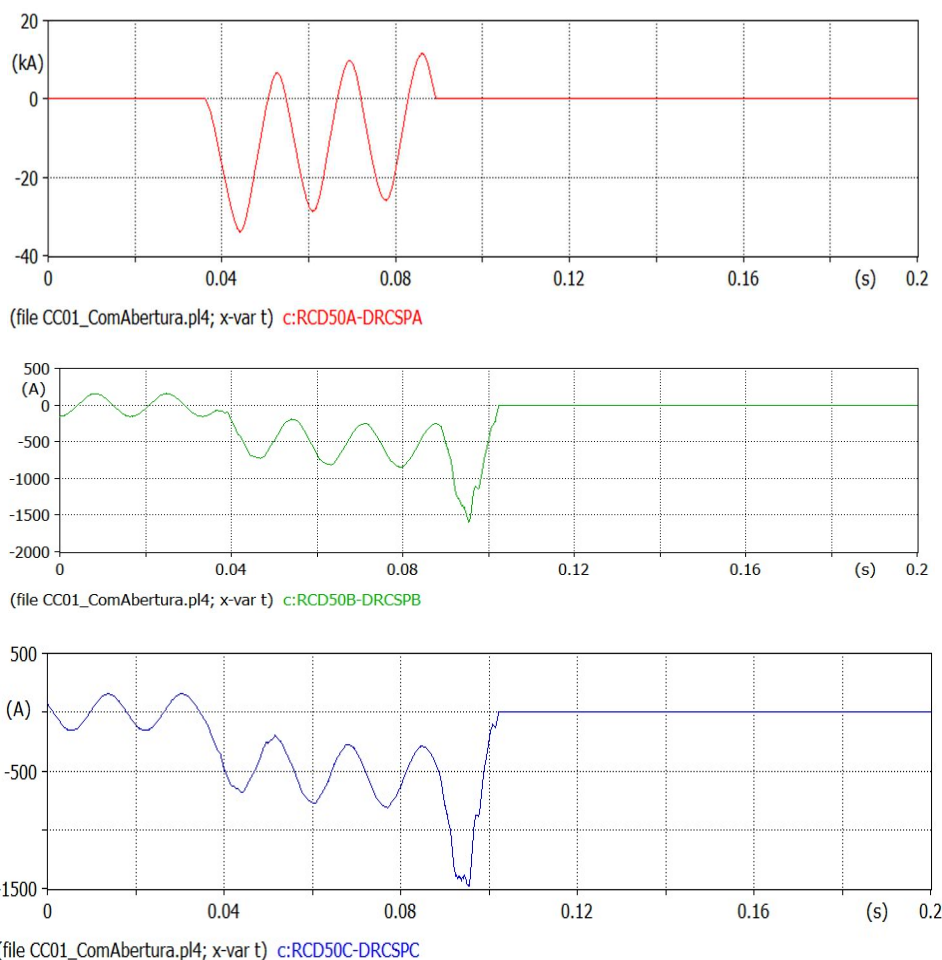


FIGURA 10: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, com reator, caso CC01, considerando a manobra de abertura tripolar do disjuntor nas condições de fluxo mínimo

4.3 Religamento Tripolar nas LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, e Angelim II - Garanhuns II, 05L5

Com base nos estudos de energização, foram simulados os casos estatísticos de religamento tripolar da linha sem e com a representação do reator e com os disjuntores dotados de resistor de pré-inserção.

Em conformidade com os critérios estabelecidos nos Procedimentos de Rede do ONS [11], e visando maximizar o retardo da passagem das correntes pelo zero, a sequência adotada para as simulações do religamento tripolar foi a seguinte [12]: a) Aplicação de defeito monofásico em um dos terminais ou no meio da linha, no instante de máximo da onda de tensão; b) Abertura tripolar do terminal em análise em 100 ms após a aplicação da falta; c) Abertura do terminal oposto, por transferência de disparo, em 20 ms após a abertura do primeiro terminal; d) Eliminação do defeito

4 ciclos após a abertura do terminal em análise, nos casos de religamento com sucesso; e) Tempo morto de 500 ms
f) Religamento estatístico da LT no instante de zero de tensão.

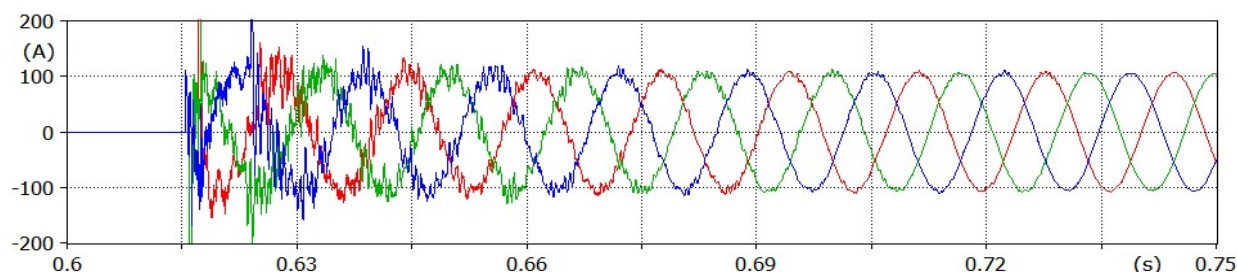
As Tabelas 7 e 8 mostram o comportamento das correntes nos disjuntores durante a manobra de religamento tripolar da LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, por Recife II e por Suape II, respectivamente. Observa-se nos casos RT01 a RT06 que, com o reator conectado, ocorrem atrasos significativos na passagem da corrente pelo zero em ambas as situações, pondo em risco a integridade desses disjuntores. Com a transferência do reator da linha para a barra de Recife II, o problema é solucionado conforme pode ser verificado na Figura 11.

TABELA 7 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de religamento tripolar da LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, pela SE Recife II, linha com o reator

| Caso | Local do defeito fase-terra | Sucesso na eliminação do defeito | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE SUD (ms) |
|------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| RT01 | RCD | Sim | 584,0 |
| RT02 | Meio da LT | Sim | 767,0 |
| RT03 | SUD | Sim | 684,7 |

TABELA 8 – Tempos máximos de retardo no cruzamento pelo zero das correntes durante manobra de religamento tripolar da LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, pela SE Suape II, linha com o reator

| Caso | Local do defeito fase-terra | Sucesso na eliminação do defeito | Tempo máximo de retardo do zero da corrente no disjuntor da SE SUD (ms) |
|------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| RT04 | SUD | Sim | 550,0 |
| RT05 | Meio da LT | Sim | 550,7 |
| RT06 | RCD | Sim | 550,6 |



(file RT9_RCD_CFM_CR_CFQ_CRN_RPI_ECS_DET.pl4; x-var t) c:RCD50A-X005A c:RCD50B-X005B c:RCD50C-X005C

FIGURA 11: Correntes no disjuntor 15L7 da SE Recife II, LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7, caso RT02, com o reator transferido para a barra da SE Recife II

De modo a verificar a possibilidade de permanência do reator na linha, foi realizada uma simulação adicional considerando a abertura tripolar intempestiva do disjuntor da SE Suape II, em 4 ciclos após o religamento da linha, de modo a investigar o comportamento das correntes de fase e como elas podem influenciar na operação do disjuntor com possibilidade de acarretar riscos a esse equipamento. O caso RT06 foi selecionado para esta análise. Os resultados dessa simulação estão apresentados na Figura 12. Observa-se nessa figura que, no caso da abertura tripolar após o religamento pela SE Suape II, as correntes das três fases são interrompidas em até 2 ciclos após a abertura da fase C. Portanto, o religamento tripolar pela SE Suape II pode ser realizado com o reator ligado à linha.

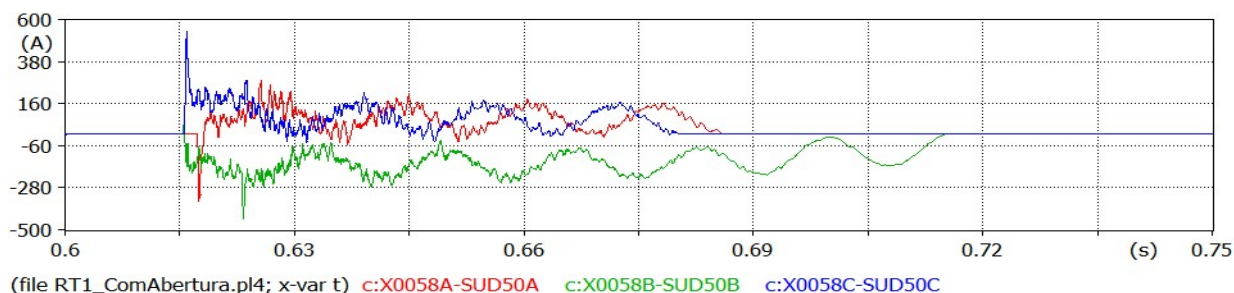


FIGURA 12: Religamento tripolar pela SE Suape II, linha com reator, corrente nas três fases do disjuntor 15L7 da SE Recife II, caso RT06, considerando uma abertura tripolar após o religamento

Nas manobras de religamento tripolar da LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, 05L5, com grau de compensação de 962%, com e sem sucesso, por ambos os terminais, não ocorrem problemas de zero atrasado nas correntes dos disjuntores. A Figura 13 ilustra essa constatação.

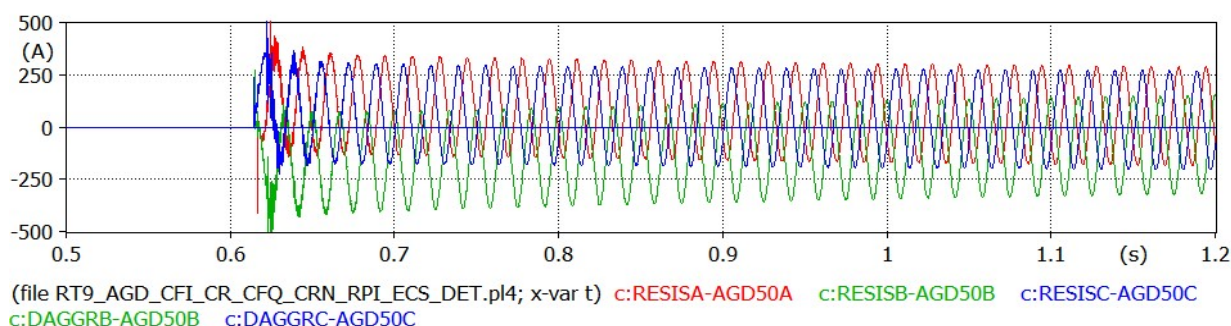


FIGURA 13: Correntes no disjuntor 15L5 da SE Angelim II, LT 500 kV Angelim II – Garanhuns II, 05L5, com reator 05E2, caso de religamento tripolar com sucesso pela SE Angelim II com curto fase-terra em Angelim II

5.0 CONCLUSÃO

Nas manobras de energização, religamento tripolar e aplicação de falta na LT 500kV Recife II – Suape II, 05L7, com reator conectado e grau de compensação de 176%, pode ocorrer atrasos na passagem da corrente pelo zero nos disjuntores desta linha em algumas situações.

Nas manobras de energização e religamento tripolar da LT 500kV Angelim II – Garanhuns II, 05L5, com reator conectado e grau de compensação de 962%, não se verifica o fenômeno de zero atrasado. Porém, na aplicação de falta nesta linha, podem ocorrer atrasos na passagem das correntes pelo zero nos disjuntores de Angelim II e Garanhuns II na condição de fluxo mínimo.

Nas simulações em que se verificam zeros atrasados, em ambas as linhas, caso seja comandada a abertura tripolar subsequente à primeira manobra, observa-se que, após a interrupção da corrente na fase que passa pelo zero, a corrente nas demais fases, que até aquele instante mostravam retardos, apresentam zeros de corrente dentro do tempo de atuação segura do disjuntor (2 ciclos). Dessa forma, é provável que a ocorrência dos zeros atrasados nesses eventos não constitua risco para este equipamento.

Assim, em todos os casos estudados para ambas as linhas, as análises indicam que o reator poderá ser mantido na LT, pois, mesmo sendo observado o fenômeno de zeros atrasados durante a energização em vazio, religamento tripolar ou aplicação de falta, isto pode não constituir um problema para os disjuntores quando comandados a realizar a abertura tripolar da linha após esses eventos.

De forma geral, a transferência do reator em derivação da linha para a barra adjacente pode ser a solução mais eficaz para evitar a ocorrência de zeros atrasados nos disjuntores destas linhas.

O resistor de pré-inserção, quando utilizado, reduz o tempo da primeira passagem pelo zero das correntes originadas das manobras realizadas. Porém, em alguns casos, esse tempo ainda é superior a 2 ciclos, que é o tempo nominal de interrupção especificado para os disjuntores.

As conclusões aqui apresentadas não podem ser extrapoladas para outras linhas do sistema, seja pelos seus diferentes graus de compensação ou por estarem inseridas em outros pontos, onde a resposta do sistema poderá ser também distinta. Recomenda-se analisar cada caso em particular, levando em consideração suas

peculiaridades, visando estabelecer uma operação segura para os disjuntores durante manobra dessas linhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEUVEN EMTP CENTER, "ATP - Alternative Transient Program - Rule Book", Herverlee, Belgium, 1987.
- [2] SILVA, F. F., et ali, Methods to Minimize Zero-Missing Phenomenon, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 25, No. 4, October . [8] OWEN, M., Overvoltages During Line Dropping of Compensated Lines. CIGRE 2012 SESSION.
- [3] OWEN, M., Overvoltages During Line Dropping of Compensated Lines. CIGRE 2012 SESSION.
- [4] KACHESOV, V. E., et ali, Requirements for Switching Algorithms of EHV Shunt Compensated OHL by SF6 Circuit-Breakers, IPST 2011.
- [5] Chesf – DES - Relatório Técnico RT-01-01-01/2014 – Análise de Zeros Atrasados em Disjuntores de 550kV Durante Manobras de Linhas de Transmissão do Eixo Fortaleza II – Pecém II – Sobral III 07/01/2014.
- [6] Chesf – DES - Relatório Técnico RT-01-04-03/2014 – LT 500 KV Sobral III-Pecém II-Fortaleza II Estudo de Zeros Atrasados em Disjuntores 550kV Durante Manobras, Extinção do Arco Secundário e Análise de Ressonância na Fase Aberta – 25/02/2014.
- [7] Freire, A. Roseval, Alves, F. R, Cruz, A. L. P. - Zeros Atrasados em Disjuntores de 550 kV durante Manobras de Linhas de Transmissão Compensadas com Reatores em Derivação: Estudo do Caso das Linhas de Transmissão Fortaleza II – Pecém II – Sobral III - XXIII SNPTEE – 18 a 21 de outubro de 2015 – Foz do Iguaçu – PR.
- [8] Chesf – DEPE – Relatório Técnico - RT-CHESF-DEPE-10-06/2020 - Análises de Ocorrência de Zeros Atrasados durante Manobras na LT 500 kV Recife II – Suape II, 05L7 – 19/09/2020.
- [9] Chesf – DEPE – Relatório Técnico - RT-CHESF-DEPE-04-03-2021 - Análises de Ocorrência de Zeros Atrasados durante Manobras na LT 500 kV AGD-GRD 05L5 – 31/03/2021.
- [10] IEC 62271-100, High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers, 2008.
- [11] Operador Nacional do Sistema Elétrico – Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3 – Versão 2021.06
- [12] Operador Nacional do Sistema Elétrico – Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – 2013.

DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando Rodrigues Alves, nascido em Campina Grande, PB, formou-se em engenharia elétrica pela UFPB, em 1978, pós-graduado em Análise de Sistemas de Potência, em 1983, pela EFEI/MG, MBA – Gestão de Negócios em 2001 pela UFPE e obteve grau de Mestre 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. É membro individual do CIGRÉ.



Fernando Edier França Freitas, nascido em Sanharó, PE, formou-se em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, em 2008. Mestre em Engenharia Elétrica na área de Processamento de Energia também pela UFPE em 2010. Trabalha na Chesf, na área de Estudos de Sistemas desde 2011. É professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE desde 2010.



Fabiana da Silva Leal, nascida em Recife, PE, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE, em 1997, concluindo o mestrado em Engenharia Elétrica nessa mesma instituição, em 2000. Trabalha na Chesf, na área de Estudos de Sistemas de Transmissão desde 2002 e suas principais atividades envolvem planejamento, especificação de equipamentos de alta tensão, estudos de transitórios eletromagnéticos, curto-circuito e linhas de transmissão.



Felipe Corrêa de Andrade, nascido em Recife, PE, em 1989. Graduiu-se em engenharia elétrica em 2013 pela Universidade de Pernambuco (UPE) e obteve o título de mestre pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2015, onde atualmente é doutorando. Desde 2016 trabalha na Chesf, atuando na área de transitórios eletromagnéticos, coordenação de isolamentos, curto-circuito, linhas de transmissão e qualidade de energia.



Francisco Rodrigues Sabino Júnior, nascido em Maranguape, CE, formou-se em engenharia elétrica pela UFC, em 2000 e obteve grau de Doutor em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 2013. Trabalha na Chesf, na área de Estudos de Sistemas de Transmissão com experiência na área de compatibilidade eletromagnética entre linhas de transmissão aéreas e tubulações metálicas, bem como na avaliação dos parâmetros elétricos do solo.



André Luiz P. Cruz, nascido em Olinda, PE, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE em 2001, é pós-graduado em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica pela UNIFEI/MG em 2007, concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica pela UFCG/PB em 2018. Trabalha na Chesf desde 2002, com experiência em estudos de transitórios eletromagnéticos e coordenação de isolamentos, especificação de equipamentos de alta tensão, e estudos elétricos de linhas de transmissão. Foi gerente da antiga Divisão de Estudos e Tecnologia de Alta Tensão – DEAT. É membro individual do CIGRÉ.



Gustavo Henrique S. Vieira de Melo, nascido em Recife, PE, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE, em 2001, pós-graduado em Análise de Sistemas de Potência, em 2007, pela UNIFEI/MG, MBA – Gestão de Negócios em 2011 pela FGV. Trabalha na Chesf, na área de Estudos de Sistemas de Potência desde 2002, com experiência nas áreas de planejamento da expansão, estabilidade dinâmica e conexão de fontes renováveis. Atualmente exerce a função de gerente do Departamento de Desenvolvimento de Oportunidades e Gestão do Portfólio de Projetos.