



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

BR/GPL/19
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**ENSAIO DA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRONCO TESTE DE UM POUCO MAIS DE MEIO
COMPRIMENTO DE ONDA**

**Camilo M. Jr(*)/Vanderlei G. Machado/Carlos A. F. Floriano/Aniela M. P. Mendes
ELETROBRAS ELETRONORTE**

**Marcelo J. A. Maia
Chesf**

**Eden L. C. Jr
EATE**

**Maria C. Tavares/Elson C. Gomes/Walmir F. Filho
UNICAMP¹**

**Fernando A. Moreira
UFBA**

**Marcos A. Paz/João B. Gertrudes¹
UEFS**

RESUMO

No presente informe os principais resultados do estudo pré-operacional relacionados com a manobra de energização de um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda (Elo CA) são apresentados. As simulações foram realizadas no PSCAD com dados do sistema elétrico brasileiro.

Especificamente os seguintes estudos foram realizados: estudos de transitórios eletromagnéticos da manobra de energização do Elo CA considerando a não ocorrência de defeito e a ocorrência de falta ao longo do tronco, desempenho dinâmico das unidades geradoras que irão energizar o Elo CA e estudo de TRT no disjuntor que irá manobrar o Elo.

As principais conclusões são que a manobra de energização pode ser implementada sem causar risco ou redução da vida-útil dos equipamentos envolvidos, como a unidade geradora, o transformador elevador, os para-raios que serão mantidos durante a manobra, assim como o disjuntor que irá energizar e desligar o Elo CA.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios eletromagnéticos, transmissão em meio comprimento de onda, Elo CA, Energização da linha, análise dinâmica, TRT, faltas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em 2008 foram aprovados oito projetos estratégicos de P&D ANEEL para serem “financiados/executados” por empresas de energia elétrica e entidades de pesquisa, dentre elas a Chamada 004/2008 cujo título é “Ensaio de Transmissão de Energia em Linha de Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda”. Conforme explicitado na chamada: “.. considera-se de grande relevância para o setor elétrico brasileiro a realização de ensaios em campo para analisar os resultados dos estudos teóricos e computacionais, especialmente quanto às sobretensões resultantes da energização e do chaveamento da linha e ao perfil das tensões ao longo da linha sem compensação reativa, na transmissão de energia em pouco mais de meio comprimento de onda.” [1-4] E ainda, “.. Tal iniciativa tem como principal objetivo avaliar a possibilidade de considerar a alternativa para transmissão em corrente alternada em linha de pouco mais de meio comprimento de onda nos estudos a serem realizados para integração das usinas do Complexo Hidrelétrico da Amazônia ao SIN” [5].

Em 2011 teve início o projeto de pesquisa, técnica e financeiramente apoiado pelas empresas ELETROBRAS/ELETRONORTE, Chesf e ENTE, sendo executado pelas seguintes universidades: UNICAMP, UEFS e UFBA.

Especificamente o principal objetivo do projeto é a realização da manobra de energização de um conjunto de linhas

do SIN de 500 kV que, quando conectadas em série, formarão um tronco de 2600 km [6]. Este comprimento corresponde a um pouco mais de meio comprimento de onda para a frequência de 60 Hz. O circuito proposto será formado pelas interligações Norte-Sul 1, Norte-Sul 2 e Nordeste-Sudeste, totalizando 2600 km [7].

Este tronco, aqui chamado de Elo CA por ser uma transmissão CA ponto a ponto, tem vantagens econômicas quando comparado à interconexão convencional CA altamente compensada (em derivação e em série). O Elo CA também é competitivo quando comparado com o HVDC já que as suas subestações terminais são compostas somente de transformadores convencionais e não há necessidade de utilizar filtros. Esta é uma importante característica uma vez que não há tecnologia de eletrônica de potência envolvida [8, 9].

Para o experimento os trechos de linha altamente compensadas terão as compensações série curto-circuitadas e as compensações em derivação removidas. Os disjuntores das subestações intermediárias serão travados na posição fechada e o localizado na subestação do terminal remoto ficará travado na posição aberta. Somente o disjuntor no terminal do gerador será manobrado. Com isto um tronco de 500 kV de 2600 km será formado. A manobra de energização será implementada através do disjuntor de 500 kV no terminal emissor. Todos os esquemas de proteção nas subestações intermediárias deverão ficar inoperantes de modo que os disjuntores não mudem de estado durante o teste.

Os principais resultados do estudo de transitório eletromagnético encontram-se apresentados nas próximas seções.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ANALISADO

O sistema de transmissão utilizado no estudo é formado por três troncos de interconexão de 500 kV que apresentam características semelhantes e serão conectados para formar o Elo CA [6, 7]. As características das linhas de transmissão são resumidas nas Tabelas 1 e 2 onde os componentes longitudinais e transversais de sequência positiva e zero por unidade de comprimento foram calculados para a frequência de 60 Hz, supondo as linhas idealmente transpostas ou balanceadas.

Tabela 1 - Parâmetros Longitudinais e Transversais de Sequência Positiva Calculados para 60 Hz

Tronco	Resistência unitária [Ω/km]	Indutância unitária [mH/km]	Capacitância unitária [$\mu\text{F}/\text{km}$]
Norte-Sul 1	0,01589	0,70700	0,01612
Norte-Sul 2	0,01602	0,71089	0,01634
Nordeste-Sudeste	0,01602	0,72403	0,01603

Tabela 2 - Parâmetros Longitudinais e Transversais de Sequência Zero Calculados para 60 Hz

Tronco	Resistência unitária [Ω/km]	Indutância unitária [mH/km]	Capacitância unitária [$\mu\text{F}/\text{km}$]
Norte-Sul 1	0,37138	4,11662	0,00725
Norte-Sul 2	0,34822	3,74452	0,00946
Nordeste-Sudeste	0,34821	3,75767	0,00934

Estes troncos têm subestações terminais que permitem que elas sejam conectadas em série. Durante os testes o Sistema Interligado Nacional não ficará completamente desconectado, uma vez que os sistemas Norte e Nordeste permanecerão interligados ao sistema Sul, Sudeste e Centro-Oeste através da interligação Norte-Sul 3.

A principal preocupação é que o teste tenha a menor duração possível. Para reduzir o tempo de preparação do teste e a posterior recomposição do sistema interligado, todos os para-raios deverão ser mantidos no sistema. Como as sobretensões sustentadas são pequenas, os para-raios não irão operar durante o teste e a sua manutenção não irá comprometer a validade do ensaio. O diagrama unifilar com as subestações e as linhas envolvidas no ensaio são apresentadas na Figura 1.

A energização será realizada a partir da subestação de Serra da Mesa (terminal emissor – TE), o que significa que o tronco inteiro será energizado através de uma única manobra do disjuntor com resistor de pré-inserção. Foi verificado que o uso de chaveamento controlado não traz benefícios para um Elo CA [6].

O ONS irá identificar quando as linhas que formarão o Elo CA poderão ser desconectadas sem colocar o SIN em situação de risco. Os períodos do ano em que estas interconexões encontram-se praticamente sem fluxo são considerados adequados para a realização do teste. O teste é planejado para ter uma duração de 2-3 horas desde a preparação do ensaio, a sua implementação com a coleta de dados e a restauração do sistema.

O solo foi representado de forma convencional, especificamente a resistividade do solo foi suposta constante com a frequência e de valor igual a $4000 \Omega \cdot \text{m}$ ao longo de todo o Elo devido aos elevados valores de resistividade de solo encontrados ao longo dos 2600 km do tronco [9].

3.0 - ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Para implementação da manobra de energização os estudos de transitórios eletromagnéticos usuais foram implementados no PSCAD, como descrito nas próximas seções.

Devido ao comprimento das linhas, as sobretensões são esperadas muito menores do que as habitualmente encontradas nas linhas regulares de algumas centenas de quilômetros. Isto ocorre porque as ondas viajantes são

atenuadas a medida que elas avançam ao longo do Elo, principalmente a componente de sequência zero.

As linhas foram modeladas no PSCAD através do modelo de fases que representa corretamente a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência.

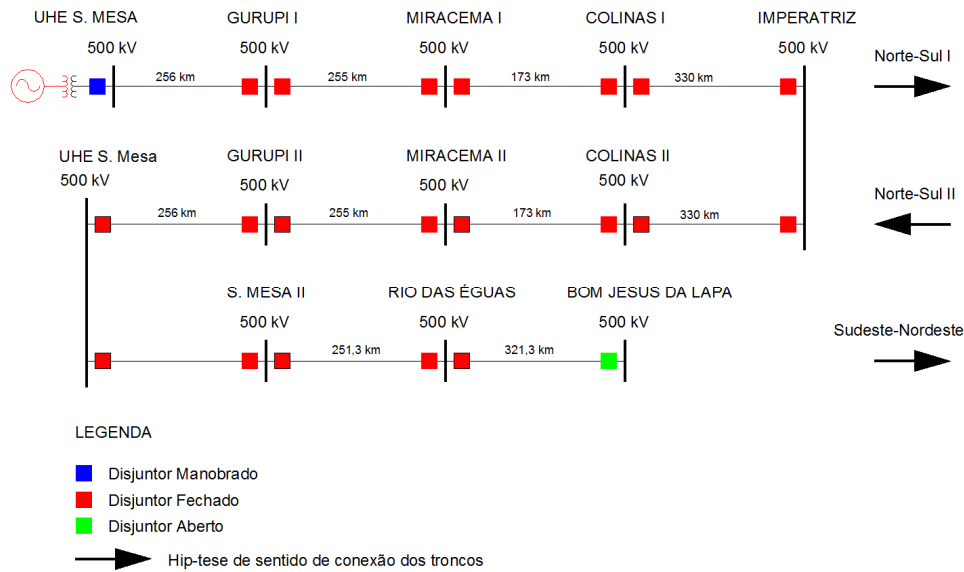


FIGURA 1 – Diagrama unifilar do circuito proposto para o ensaio.

3.1 Energização da linha sem defeito

A suportabilidade das linhas de 500 kV formadoras do Elo CA Teste e dos equipamentos conectados a ele durante o ensaio não foi ultrapassada durante as análises de energização.

A manutenção dos para-raios ao longo da LT, em todas as SEs, não apresenta influência importante quando comparado ao caso com para-raios apenas nas extremidades do Elo. Os níveis de sobretensões observados durante a manobra e a energia dissipada nos para-raios foram muito reduzidos, estando dentro dos limites estabelecidos para os equipamentos. Na Figura 2 as tensões fase-terra no terminal remoto do Elo são apresentadas.

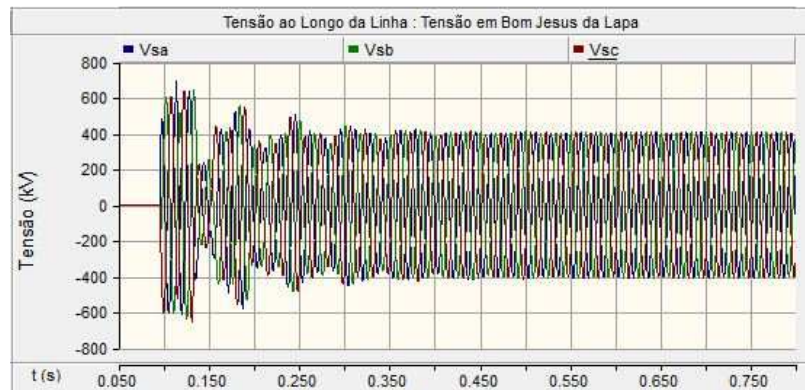


FIGURA 2 – Tensão no terminal receptor durante manobra de energização do Elo CA – tensão pré-manobra de 0,9 pu, sem resistor pré-inserção.

Comparada a uma linha curta de comprimento elétrico equivalente (133 km), o Elo CA Teste apresenta sobretensões transitórias menores e atinge o regime permanente mais rapidamente. Esta linha curta corresponderia à diferença entre o comprimento do Elo CA e a metade exata do comprimento de onda.

Variando o número de máquinas geradoras na manobra de energização do Elo, os casos com menores sobretensões e menor valor de tensão em regime permanente são obtidos utilizando-se três geradores. É possível energizar o Elo CA com qualquer número de máquinas em Serra da Mesa. As simulações mostraram que os níveis de sobretensão e as tensões em regime permanente não ultrapassam a suportabilidade do sistema. Na Figura 3 as maiores sobretensões obtidas ao longo do Elo em função do número de geradores são apresentadas.

É possível efetuar a manobra de energização a partir do complexo hidrelétrico de Serra da Mesa com e sem o uso de resistor de pré-inserção no disjuntor da LT. No projeto do disjuntor o resistor deve permanecer em serviço de 8 a 10 ms e este tempo não é adequado para mitigar as sobretensões no Elo CA [6]. Para o Elo o resistor deveria ficar em serviço por 20 ms para que as ondas viajantes atingissem o terminal remoto e retornassem ao menos uma vez. Como isto implicaria uma importante alteração, a outra opção seria curto-circuitar o resistor. No entanto este procedimento iria impactar no tempo de preparação do teste. Como as sobretensões com o resistor mantido por

10 ms ou sem o resistor não foram importantes, o teste poderá ser realizado com o resistor operando como originalmente projetado.

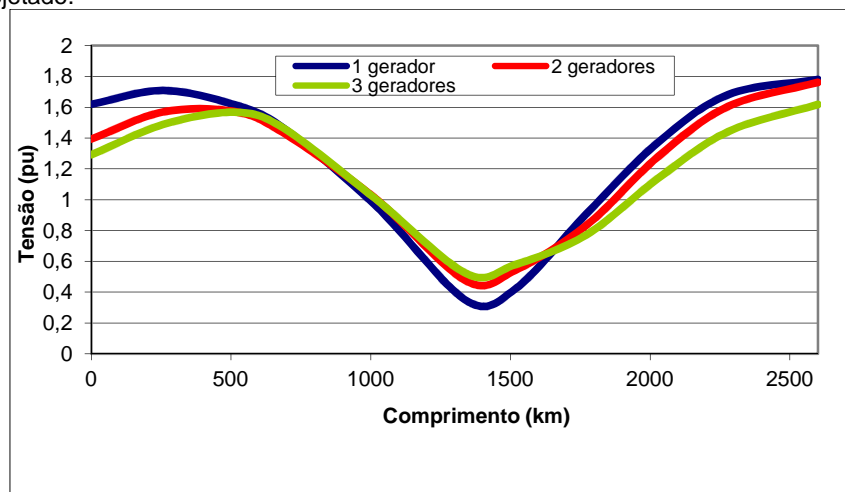


FIGURA 3 – Sobretensão fase-neutro máxima durante energização do Elo CA Teste com resistor de pré-inserção ($400\ \Omega - 8\text{ ms}$), em vazio, aplicando-se tensão pré-manobra de 0,9 pu no terminal emissor.

3.2 Energização da linha sob falta

Foram realizados estudos considerando uma eventual ocorrência de defeito (falta monofásica e trifásica, com e sem terra) ao longo do Elo CA Teste durante a realização do ensaio.

Ainda que o experimento deva ser realizado com tempo bom, devido a extensão do Elo CA é possível que chova em algum lugar. No entanto, em virtude da curta duração do teste a probabilidade de ocorrer um defeito durante o ensaio é muito baixa. Contudo, os equipamentos envolvidos, especificamente a unidade geradora, o transformador elevador, o disjuntor e os para-raios não devem sofrer danos, e deverão voltar ao serviço imediatamente após o ensaio.

As faltas foram representadas como deslizantes ao longo do Elo, aplicadas nos terminais de cada trecho de linha e no meio das linhas. Quando a falta causava sobretensão importante, o intervalo de aplicação do defeito era reduzido. A falta foi representada por um resistor de $20\ \Omega$. As simulações consistiram em energizar o Elo sob falta, eliminando o defeito após 100 ms. As tensões fase-terra no terminal emissor para falta monofásica são apresentadas na Figura 4.

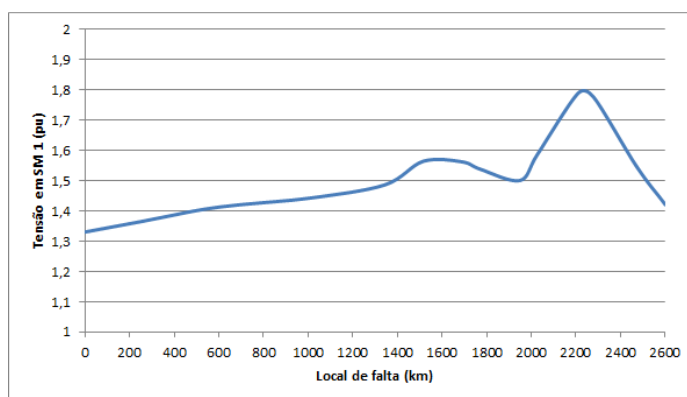


FIGURA 4 – Tensões máximas nos terminais do disjuntor de Serra da Mesa para faltas monofásicas ao longo do Elo CA.

As faltas monofásicas produzem sobretensões dentro dos limites de suportabilidade das linhas, sendo limitadas em torno de 2,0 pu devido aos para-raios existentes ao longo do Elo CA Teste. A energia dissipada pelos para-raios não é elevada, estando abaixo da sua capacidade térmica, exceto para os casos de falta monofásica ocorrendo numa região identificada como mais severa, especificamente entre 85 e 95 % do comprimento medido a partir da subestação de Serra da Mesa. Para estes casos será necessário verificar a capacidade térmica dos para-raios existentes em Bom Jesus da Lapa (BJL), e em função desta análise instalar um para-raios adicional para evitar dano ao para-raios de B JL numa eventual ocorrência de falta monofásica nesta região. O relé existente na subestação de SM foi testado num estudo com RTDS e o tempo de operação evitou este elevado nível de energia nos PR de B JL [10].

A máxima corrente observada no disjuntor, obtida para falta terminal, atinge valor de 2,6 kA de pico. A maior corrente de falta obtida por um curto circuito monofásico a 70 % do comprimento total do Elo medido de SM atinge 2,9 kA. A corrente no neutro do transformador apresenta valor máximo de 2,86 kA.

Os valores obtidos nas simulações de faltas trifásicas aterradas e isoladas são próximos entre si. As sobretensões

e as sobrecorrentes devido às faltas trifásicas variam de severidade em função da localização do defeito, sendo severas se a falta ocorrer entre 65 % e 95 % do comprimento do Elo (medido a partir do terminal emissor e variando em função da potência de curto-circuito do barramento terminal).

As regiões críticas para as faltas 1ft e 3f estão relacionadas com as impedâncias de sequência vistas pelo terminal emissor. Por exemplo, para a falta 1ft a região crítica ocorre em múltiplos de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da componente de sequência zero (visto de TE). A rede neste terminal também irá influenciar a região de quaresonância, mas neste experimento o maior efeito será do próprio Elo CA uma vez que a rede no terminal é formada somente pela unidade geradora e o transformador elevador (o sistema é isolado).

Para as faltas 3f as regiões críticas correspondem a múltiplos de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da componente de sequência positiva vista do TE. Nestas regiões sobretensões sustentadas podem ser estabelecidas e devem ser eliminadas rapidamente.

Para as faltas 3f, as sobretensões crescem numa taxa elevada uma vez que a atenuação de sequência positiva para 60 Hz é muito pequena. Neste ponto uma análise incorreta normalmente é efetuada nos trabalhos envolvendo a transmissão em meio comprimento de onda. Como as sobretensões que se formam são elevadas, muito acima do nível de isolamento da linha, as simulações não podem medir tensões ao longo da linha supondo que as disrupções não irão ocorrer. Não há sentido em medir sobretensões de 4,0 pu porque antes disto um curto-circuito terá ocorrido. Quando o curto ocorrer o Elo será imediatamente removido da condição de quase-ressonância, sendo que as tensões que surgirão ao longo do elo e no TE irão depender da nova localização do defeito.

Para mitigar as perturbações devido às faltas trifásicas, foi desenvolvido um método para o ensaio que consiste na fragilização da cadeia de isoladores (DIR - Distância de Isolamento Reduzida) [10] numa torre próxima da subestação de Imperatriz (40 % do TE) de modo a provocar a disrupção de arco junto à cadeia para sobretensões superiores a 1,60 pu (tensão fase-terra). Desta forma as elevadas sobretensões não se estabelecem e o curto-circuito trifásico ocorre no local pré-determinado, nas proximidades da subestação de Imperatriz, sendo que para este local as sobretensões que surgem devido ao curto não são importantes, assim como as correntes no disjuntor.

O DIR foi projetado para atuar a 1,6 pu (tensão fase-terra) porque:

- Esta tensão é muito maior do que a sobretensão transitória máxima observada durante a manobra de energização sem defeito (máximo valor medido de 1,20 pu);
- Durante o regime permanente após a energização do Elo a tensão neste local é muito baixa (0,54 pu);
- As faltas 3f neste local não produzem sobretensões severas ou sobrecorrentes importantes ao longo do Elo CA Teste.

Com o uso da DIR, os valores das sobretensões causadas durante faltas trifásicas ficam dentro dos limites de suportabilidade da LT, assim como as solicitações de energia aos para-raios são muito abaixo da capacidade térmica dos mesmos. Os maiores valores de corrente no disjuntor, corrente no neutro do transformador e corrente na DIR são, respectivamente, 3,11 kA, 2,41 kA e 8,32 kA. A corrente na DIR é menor do que a corrente de descarga que pode atingir valores superiores a 30 kA e, desta forma, a cadeia de isolador neste local não será danificada.

Na Figura 5 as máximas sobretensões e máximas correntes as medidas no TE durante a ocorrência de faltas 3ft são apresentadas. As máximas correntes na DIR são apresentadas na Figura 6.

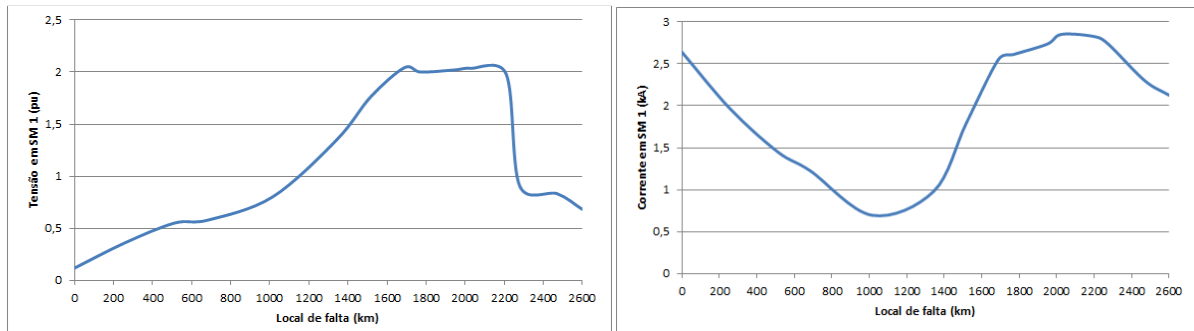


FIGURA 5 – Tensões fase-terra (a) e correntes (b) máximas nos terminais do disjuntor de Serra da Mesa para faltas trifásicas aterradas ao longo do Elo CA.

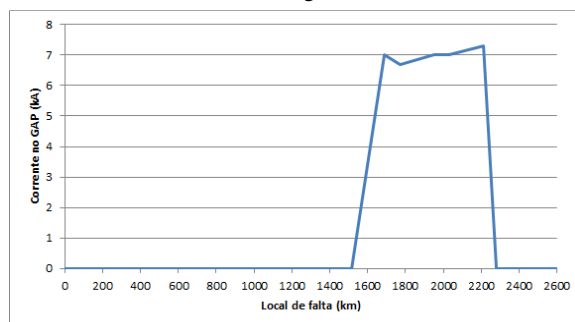


FIGURA 6 – Correntes máximas na DIR localizada em Imperatriz para faltas trifásicas aterradas ao longo do Elo CA.

A DIR não irá atuar para falta 1f porque as sobretensões em Imperatriz não atingem 1,60 pu. A DIR somente atuará para faltas 3f na região crítica, como pode ser observado na Figura 4.

3.3 Desempenho Dinâmico do Gerador Durante a Energização Sem Defeito

A energização do Elo CA Teste pode ser realizada utilizando-se 01, 02 ou 03 unidades geradoras de Serra da Mesa. As solicitações aos geradores são maiores se somente uma máquina for utilizada, porém os valores obtidos não comprometem a integridade do equipamento nem implicam redução de vida útil.

Na Figura 7 as potências ativas e reativas são apresentadas para energização sem resistor de pré-inserção.

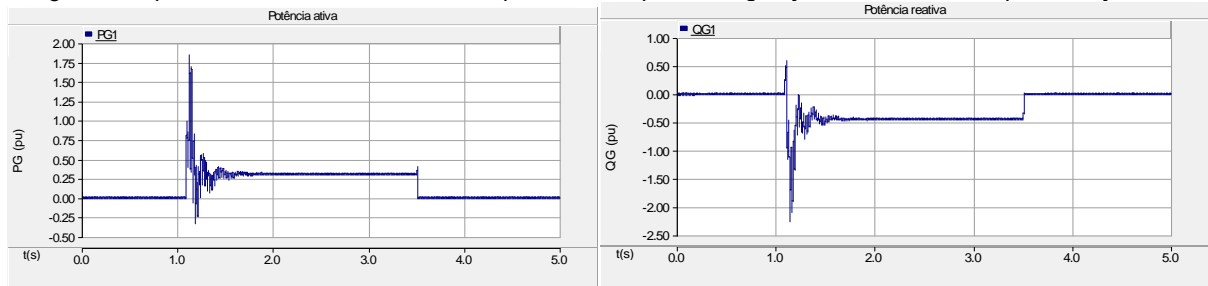


FIGURA 7 – Potência ativa (a) e potência reativa (b) injetada por 1 unidade geradora durante energização do Elo CA Teste – tensão pré-manobra de 0,9 pu, sem resistor pré-inserção.

3.4 Desempenho Dinâmico do Gerador Supondo a Ocorrência de Defeitos Monofásicos e Trifásicos Durante o Ensaio

Estudos foram realizados considerando uma eventual ocorrência de defeito ao longo do Elo CA Teste durante a realização do ensaio.

No caso de ocorrência de falta monofásica as solicitações não causam danos aos geradores ou acarretam em redução de vida útil dos equipamentos. No caso específico de faltas monofásicas ocorrendo na região que provoca as maiores perturbações, especificamente entre 85 e 95 % do comprimento do Elo medido a partir do TE, o gerador precisa fornecer acima de 1,50 pu de potência ativa e 0,50 pu de potência reativa. Estes valores não comprometem a integridade do gerador devido à curta duração de um eventual defeito.

No caso de ocorrência de falta trifásica (aterrada ou isolada) as solicitações novamente não causam danos aos geradores ou redução de vida útil aos equipamentos. No caso de ocorrência de falta trifásica durante o ensaio nas regiões críticas do Elo, que resultam nas solicitações mais severas (entre 65 e 95 % do comprimento do Elo CA), a DIR atua rapidamente protegendo o gerador. Durante o transitório ocasionado pelo defeito, a corrente fornecida pelo gerador atinge 3,0 pu, reduzindo rapidamente para 0,70 pu. Após o transitório do defeito a máquina injeta 0,1 pu de potência ativa e 0,60 pu de potência reativa, conforme apresentado na Figura 8.

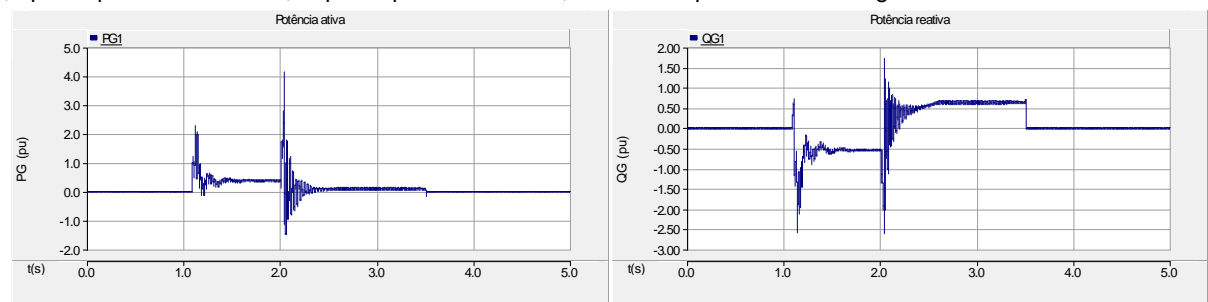


FIGURA 8 – Potência ativa (a) e potência reativa (b) injetada por 1 unidade geradora durante energização do Elo CA Teste sob falta trifásica (pior caso) – tensão pré-manobra de 0,9 pu, sem resistor pré-inserção.

3.5 Abertura da Linha em Vazio - Sem Defeitos

A abertura do Elo CA em vazio resulta em corrente capacitiva muito pequena e a tensão entre os polos do disjuntor não é severa e atenua rapidamente, como apresentado na Figura 9.

O valor de pico da TRT no disjuntor da SE Serra da Mesa foi 1,19 pu, ocorrendo em 55,35 ms após a abertura dos seus contatos. A máxima corrente capacitiva a ser interrompida pelos disjuntores foi inferior ao valor limite estabelecido em norma, sendo seu valor igual a 350,3 Aef.

Os resultados dos estudos indicam a viabilidade de abertura do Elo CA Teste utilizando o disjuntor existente na SE Serra da Mesa com capacidade de interrupção de 40 kA. As correntes capacitivas nos polos do equipamento e as sobretensões aos quais esses ficam submetidos se mostram inferiores aos estabelecidos na norma ABNT NBR IEC 7118:1994.

3.6 Abertura da Linha em Vazio Supondo a Ocorrência de Defeitos Monofásicos e Trifásicos Durante o Ensaio

As simulações consistiram na energização e subsequente abertura considerando falta terminal, quilométrica e remota. As faltas estudadas foram 1ft e 3f (aterrada e isolada). Para a análise do defeito remoto foi feita uma varredura do local do defeito, procurando identificar os locais que causam as maiores solicitações ao disjuntor. Como não há uma norma para a abertura de uma linha com este comprimento, os estudos foram feitos comparando as solicitações no Elo CA com as da linha para a qual o disjuntor foi projetado para as faltas terminal e quilométrica. A linha existente é a Serra da Mesa 1 – Gurupi 1 (SM1-GU1) de 256 km com compensação em derivação em ambos os terminais.

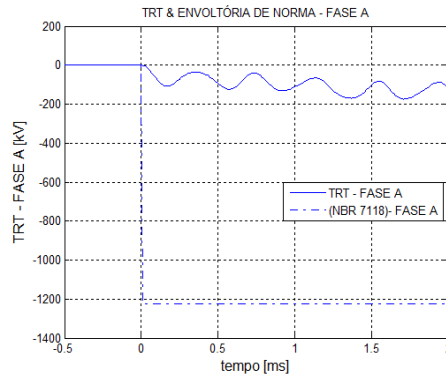


FIGURA 9 – Abertura em vazio do Elo CA Teste – tensão pré-manobra de 1,10 pu.

Foi verificado que:

- A falta terminal no Elo CA é semelhante à da linha SM1-GU1 com compensação, como mostra a Figura 10-a;
- As faltas quilométricas para o Elo CA são menos severas do que para a linha SM1-GU1, uma vez que a indutância da compensação em derivação irá produzir TRT maiores (Figura 10-b);
- As maiores correntes a serem interrompidas não são definidas pela falta terminal, mas sim pela falta remota trifásica na região crítica. Esta região corresponde a 60 a 85 % do comprimento do Elo (medido do disjuntor);
- As tensões entre os polos do disjuntor para faltas trifásicas remotas não são severas quando o método de mitigação DIR está presente;
- A TRT produzida pela falta 1ft remota não é severa.

O disjuntor existente na SE de Serra da Mesa permite a abertura da LT para os casos de falta terminal, faltas quilométricas e faltas remotas.

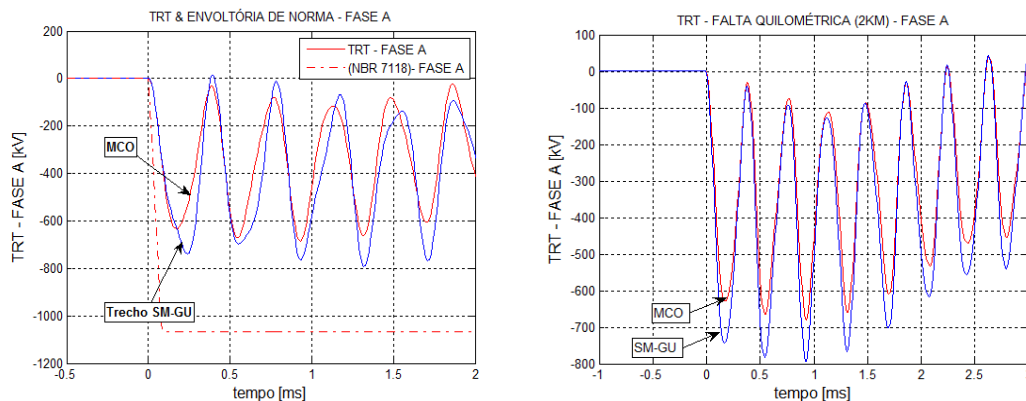


FIGURA 10 – (a) TRT para falta terminal monofásica (1ft) e (b) TRT para falta quilométrica 1F-T- último pólo a abrir (2 km).

4.0 - CONCLUSÃO

No presente informe os resultados do estudo de transitórios eletromagnéticos referentes à energização do Elo CA formado por linhas de 500 kV semelhantes foram apresentados.

Os estudos mostram que é possível realizar o experimento mantendo os para-raios nos terminais de cada trecho de linha que irá formar o Elo sem comprometer a validade de manobra. Estes para-raios não irão operar durante o ensaio de energização. Este procedimento reduz drasticamente o tempo de preparação para o ensaio, assim como o tempo para a desconexão e o reposicionamento dos trechos no SIN.

O uso da Distância de Isolamento Reduzida (DIR) numa torre próxima da subestação de Imperatriz mitigará as sobretensões que por ventura surgirem quando uma falta trifásica ocorrer numa região específica do Elo (de 60 a 85 % do comprimento do Elo medido do disjuntor). Este método é adequado para a manobra de energização durante o teste, mas uma outra solução está sendo desenvolvida para a operação normal do Elo CA.

Com a DIR a falta trifásica deixa de ser uma condição severa para a energização de uma linha de transmissão em meio comprimento de onda. As faltas 1ft não produzem sobretensões elevadas, mas a energia absorvida pelos para-raios no terminal remoto pode se tornar excessiva se a proteção não atuar como projetada [10]. Neste caso um para-raios adicional ou um para-raios com alta capacidade térmica pode ser necessário.

Em relação às unidades geradoras, os requisitos para operação normal e operação sob falta não resultaram em solicitações especiais, e a máquina existente em Serra da Mesa é capaz de energizar o Elo CA sem se danificar ou ter sua vida útil reduzida.

O disjuntor da linha SM1-GU1, que foi projetado para a linha de 256 km altamente compensada, é capaz de abrir o Elo CA em vazio e também de abrir o Elo CA sob falta 1ft e 3f (terminal, quilométrica e remota). Mesmo se a falta ocorrer nos locais críticos o disjuntor não sofrerá solicitações importantes.

Pode se afirmar que o ensaio da manobra de energização do Elo CA Teste pode ser realizado no sistema estudado sem danificar os equipamentos envolvidos (especificamente a unidade geradora, o transformador, o disjuntor, os para-raios e os trechos de linha). Não haverá dano aos equipamentos envolvidos, nem redução da sua vida útil devido às solicitações impostas no ensaio.

O Elo CA em Ultra Alta Tensão é uma solução confiável e tecnicamente robusta para troncos de transmissão a muito longa distância e, devido à sua tensão terminal constante para todas as cargas, deve ser considerado como uma opção para transferência de energia intermitente, como as produzidas por fontes alternativas de energia, como grandes usinas solares e plantas eólicas.

Em [11] e [12] alguns resultados da proteção do Elo são apresentados. Estudos sobre o religamento monopolar estão em desenvolvimento e serão apresentados brevemente. Como o custo do Elo CA é atrativo para a transmissão a muito longa distância, soluções técnicas devem ser desenvolvidas para necessidades específicas do Elo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hubert, F. J.; Gent, M. R., "Half-Wavelength Power Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.84, no.10, pp.965-974, Out. 1965.
- (2) Prabhakara, F.S.; Parthasarathy, K.; Rao, H.N.R., "Analysis of Natural Half-Wave-Length Power Transmission Lines", IEEE PAS, vol. 88, no.12, pp.1787-1794, Dez. 1969.
- (3) Gatta, F.M.; Ilceto, F., "Analysis of some operation problems of half-wave length power transmission lines", AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference, pp.59-64, 22-24 Set. 1992.
- (4) Portela, C., "Some Aspects of Very Long Lines Switching", CIGRE SC 13 Colloquium 1995, 12 p., Florianópolis, Brasil, 1995.
- (5) J. L. Alqueres and J. C. Praça, "The Brazilian power system and the challenge of the Amazon transmission", 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf., pp. 315-320, 1991.
- (6) Tavares, M.C.; Portela, C.M., "Proposition of a Half-Wave Length Energization Case Test", International Conference on Power Systems Transients (IPST'09), Kyoto, Japão, 2009.
- (7) Gomes, E.C.; Tavares, M.C., "Analysis of the Energization Test of a Half-Wavelength AC-Link Composed of Similar Transmission Lines", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, pp.1-5, 25-28 Mar. 2011.
- (8) C. Portela, J. Silva, M. Alvim, "Non-Conventional AC Solutions Adequate for Very Long Distance Transmission - An Alternative for the Amazon Transmission System", Proc. 2007 IEC/CIGRE UHV Symposium Beijing, art. 2-2-5, 29 p., Pequim, China, 2007.
- (9) Song Y., Fan B., Bai Y., Qin X., Zhang Z., "Reliability and Economic Analysis of UHV half-Wave-length AC Transmission", 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON 2012), Nova Zelândia, Out. 2012.
- (10) Portela, C. M., Tavares, M. C., Pissolato Filho, J., Gertrudes, J. B., "Earth Conductivity and Permittivity Data Measurements - Influence in Transmission Line Transient Performance", Electric Power Systems Research, Vol. 76, No 11, p 907-915, Jul. 2006.
- (11) Gomes, E.C.; Tavares, M.C.; Floriano, C. "Using conventional protection for line-to-ground fault at AC-Link", International Conference on Power Systems Transients (2013 IPST), Vancouver, Canadá, 18-20 jul. 2013.
- (12) Gertrudes, J. B., Gomes, E. C., Tavares, M. C., "Circuit breaker TRV on AC-Link trunk with a little more than half-wavelength", 2013 IPST, Vancouver, Canadá, 18-20 jul. 2013.
- (13) Fabián, R.; Tavares, M.C., "Using of Conventional Relays for Protecting AC-Link from Three-Phase Faults", 2013 IPST, Vancouver, Canadá, 18-20 jul. 2013.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os resultados apresentados neste informe são resultados parciais do projeto apoiado pela ELETROBRAS/ELETRONORTE, Chesf e ENTE como parte do projeto estratégico ANEEL 2008 (proc.. 4500072477). O projeto foi coordenado pela UNICAMP com participação da UEFS e da UFBA.

Os autores agradecem o apoio da FAPESP, do CNPq e da CAPES.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Camilo Machado Júnior: Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (1980), com especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1984). Trabalha desde 1980 na área de Planejamento de Sistemas da Eletrobrás Eletronorte, desenvolvendo atividades de estudos de sistemas, transitórios eletromagnéticos e especificação de equipamentos elétricos.

Vanderlei Guimarães Machado: Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (1978), com especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Santa Catarina (1979). A partir de 1988 entrou na equipe de Planejamento de Sistemas da Eletrobrás Eletronorte desenvolvendo atividades de estudos de sistemas, fluxo de potência, expansão econômica de sistemas, modulação de transformadores, fenômenos eletromagnéticos de linhas de transmissão, condutor econômico, transitórios eletromagnéticos e concepção de novas tecnologias de torres de transmissão.

Aniela Maria Peixoto Mendes: Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2006). Atualmente é engenheira de operação na área de Estudos Elétricos da Operação de Sistema da Eletrobras Eletronorte, desenvolvendo atividades de estudos de sistemas de transmissão, em regime permanente, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

Carlos Antonio Faria Floriano: Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1978), com especialização em Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (2003). Atualmente é engenheiro na área de Estudos de Proteção da Eletrobras Eletronorte, desenvolvendo atividades de estudos de graduação de proteções e análise de ocorrências.



Marcelo José de Albuquerque Maia: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (1978), pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1980) e MBA em Administração de Empresa pela Fundação Getulio Vargas - RJ (1997). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica e Transitórios Eletromagnéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: Transitórios de chaveamento, controle de tensão, compensação de reativos, reator saturado e para-raios.

Eden Luiz Carvalho Junior: Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Norte do Paraná (2007), com especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Osvaldo Cruz (2009). Trabalha desde 2008 na gestão do programa e dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento das empresas do Grupo TBE.

Maria C. Tavares: Engenheira eletricista (1984) pela UFRJ, M.Sc (1991) - COPPE/UFRJ, D.Sc.(1998) - UNICAMP. Trabalhou em firmas de consultoria em engenharia elétrica com análise de sistemas de potência, HVDC e planejamento de transmissão elétrica. Atualmente é professora Associada na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. Suas áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, transmissão a longa distância e aplicações computacionais para a análise de transitórios em sistemas de potência.

Elson Costa Gomes: Engenheiro Eletricista (2008) graduado pela UFMT - Universidade Federal do Mato Grosso, mestrado em engenharia elétrica pela UNICAMP (2012) e doutorando em Engenharia Elétrica na UNICAMP. Atualmente é engenheiro do ITAI. Área de interesse: transitórios eletromagnéticos em sistema de potência.

Walmir Freitas Filho: Engenheiro Eletricista pela UNESP (1994), mestrado em engenharia elétrica pela UNESP (1996) e doutor pela UNICAMP (2001). Atuou com pesquisador e professor visitante na Universidade de Alberta, Canadá, nos períodos de 2002 a 2003, 2005 a 2006 e 2011 a 2012. Atualmente é Professor Associado na UNICAMP. Suas principais áreas de atuação são dinâmica de sistemas de potência, geração distribuída e sistemas de distribuição

Marcos A. Paz: Engenheiro Eletricista pela Universidade Vale do Rio Doce (1995), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2005). Atualmente é professor Adjunto na Universidade Estadual de Feira de Santana – Departamento de Tecnologia. Área de interesse: transitórios eletromagnéticos em sistema de potência.

João B. Gertrudes: nascido em Cabo Verde. Engenheiro eletricista pela USP (EESC/USP - 2002), mestrado em engenharia elétrica pela UNICAMP (2005) e doutorado pela UNICAMP (2010). Atualmente é professor Adjunto na Universidade Estadual de Feira de Santana – Departamento de Tecnologia. Área de interesse: transitórios eletromagnéticos em sistema de potência.

Fernando A. Moreira: Engenheiro Eletricista (1994) pela USP – São Paulo, M.Sc. em Engenharia Elétrica (1997) pela USP – São Paulo e Ph.D. em Engenharia Elétrica (2002) pela University of British Columbia. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia. Suas principais áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência e métodos numéricos aplicados a solução de redes elétricas.