



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

GSC - 27
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: DISTINÇÕES
NOS RESULTADOS EM FUNÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL UTILIZADO**

Alécio B. Fernandes*

Antonio Carlos S. de Lima

Roberval M. da Silva

ONS

UFRJ

ONS

RESUMO

Em caso de desligamentos intempestivos de linhas de transmissão, o religamento automático pode ser efetuado com uma alta probabilidade de sucesso. Para tanto, faz-se necessário avaliar as solicitações decorrentes do processo de religamento, via estudos de transitórios eletromagnéticos. Em tais estudos a correta representação do fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão, é de fundamental importância. No presente trabalho apresentam-se as distinções que podem ser verificadas em estudos de religamento automático de linhas de transmissão, em função do modelo computacional. Tem-se como enfoque os modelos de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos constantes e dependentes da frequência, disponibilizados nos programas tipo EMTP. Simulações em um sistema real, mostram que a depender do modelo computacional utilizado, pode-se restringir a ativação do religamento automático, quando uma representação mais precisa revela a possibilidade desta.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios eletromagnéticos, Linhas de transmissão, Religamento automático, Modelos computacionais, Dependência com a frequência.

1.0 - INTRODUÇÃO

A grande maioria dos desligamentos intempestivos de linhas de transmissão é de caráter temporário, extinguindo-se após algumas centenas de milissegundos, a exemplo dos desligamentos devidos a descargas atmosféricas, diretas ou indiretas, e queimadas.

Nestes casos o religamento automático das linhas de transmissão pode ser efetuado com uma alta probabilidade de sucesso, sem maiores conseqüências para o sistema, a não ser um rápido período transitório, ao término do qual o sistema retorna à condição em regime permanente anterior ao defeito.

Caso o defeito permaneça após a primeira tentativa de religamento, tem-se um religamento sem sucesso e nestes casos o sistema de proteção tornará a atuar desligando novamente a linha. As tentativas de religamento são ajustáveis com uma temporização, que pode variar entre a primeira tentativa e as seguintes. Normalmente as normas operativas das empresas concessionárias de energia elétrica prevêm um número determinado de religamentos automáticos.

Visando uma maior probabilidade de sucesso no religamento, como função da extinção do arco voltaico no ponto de falta, se prevê um retardo no tempo para a inicialização do processo de religamento do disjuntor. Este tempo de retardo é comumente denominado de "tempo morto", e quanto maior for este tempo, maior será a probabilidade de extinção do arco, e assim maior a probabilidade de sucesso do religamento.

* Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS

Valores típicos adotados como “tempo morto” variam entre 500,0ms e 15,0s (em alguns circuitos de 500kV no Brasil, responsáveis pela interligação entre regiões), a depender de diversos parâmetros, tais como classe de tensão, limitações dinâmicas de estabilidade, dentre outros.

Quando do fechamento do primeiro terminal da linha (terminal líder), mais uma vez se prevê um retardo no tempo para o fechamento do segundo terminal (terminal seguidor) visando evitar o restabelecimento da linha no caso de um religamento sem sucesso. A este novo tempo de retardo soma-se ainda um tempo comumente denominado de “verificação de sincronismo”, no qual alguns ajustes de diferenças (tensão, ângulo e frequência) têm de ser verificados para o restabelecimento completo da linha, sendo da ordem de algumas centenas de milissegundos.

O religamento pode ser monopolar ou tripolar, uma vez que o defeito pode se dar em apenas uma das fases ou envolver as três fases.

Para se ter uma avaliação dos valores de sobretensões e sobrecorrentes decorrentes do processo de religamento, nos diversos pontos do sistema em questão, faz-se necessário realizar estudos de transitórios eletromagnéticos.

Nestes estudos avaliam-se as sobretensões e sobrecorrentes transitórias, bem como as energias dissipadas nos pára-raios, em virtude do religamento de linhas de transmissão (com e sem sucesso), estabelecendo as condições para a ativação destes de acordo com critérios estabelecidos.

Nos estudos de religamento a correta representação do fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão, é de fundamental importância para uma avaliação precisa das grandezas envolvidas, a ponto de restringir ou não a ativação do procedimento de religamento automático. Para tanto, o modelo computacional a ser utilizado na representação da linha de transmissão sob análise, definirá diretamente a precisão dos resultados em relação ao que acontecerá em campo (mundo físico).

Do ponto de vista sistêmico, o uso de modelos distintos podem conduzir a repercussões distintas em instalações e equipamentos.

No presente trabalho apresentam-se as distinções que podem ser verificadas em estudos de religamento automático de linhas de transmissão, em função do modelo computacional utilizado para representação da linha de transmissão sob análise.

Tem-se como enfoque os modelos de linhas de transmissão no domínio modal a parâmetros distribuídos constantes e dependentes da frequência, disponibilizados nos programas tipo EMTP, especificamente no programa ATP (*Alternative Transients Program*).

Utilizando o programa ATP, apresentam-se diferenças significativas nos resultados de estudos de religamento automático de linhas de transmissão em sistemas reais, em função do modelo computacional utilizado.

Mostra-se que ao considerar a condutância em derivação (ou *shunt*), os modelos a parâmetros distribuídos dependentes da frequência representam com maior precisão o fenômeno físico na determinação da carga residual da linha de transmissão durante o “tempo morto”.

Simulações no domínio do tempo mostram que a depender do modelo computacional utilizado, pode-se restringir a ativação do religamento automático, quando uma representação mais precisa revela a possibilidade desta ativação.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO: CÁLCULO DE PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Considere um elemento infinitesimal de uma linha de transmissão monofásica com comprimento dx , como mostrado na Figura 1.

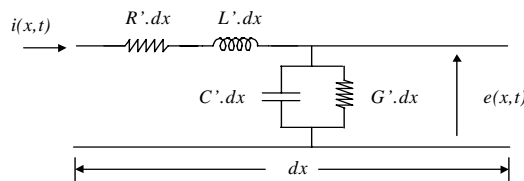


FIGURA 1 – Elemento infinitesimal de uma linha monofásica.

Na Figura 1: R' = resistência em Ω/km ; L' = indutância em H/km ; G' = condutância de dispersão em S/km ; C' = capacitância em F/km .

Enquanto, para linhas polifásicas, a resistência R' e a indutância L' são dependentes da frequência, e podem ser calculados a partir dos dados intrínsecos dos condutores, de sua disposição e das características do retorno pelo solo, a capacitância C' é praticamente constante na frequência e depende exclusivamente da geometria da linha (1), (2).

Em programas tipo EMTP, a condutância de dispersão (ou *shunt*), G' , é representada por uma matriz diagonal, cujos valores, g_{ii} , são definidos por padrão, sendo permitido ao usuário alterá-los. Valores padrões são: $0,2 \times 10^{-9}$ S/km na rotina FDDATATM do programa MICROTRAN[®](3); $2,0 \times 10^{-9}$ S/km na rotina LINE CONSTANTS do programa ATP (4); e $1,0 \times 10^{-7}$ S/km na rotina LINE CONSTANTS do PSCAD/EMTDC (5).

Em suma, para uma linha polifásica pode-se escrever:

$$\begin{aligned} Z'(j\omega) &= Z'_{i-int}(j\omega) + Z'_{ext}(j\omega) + Z'_{solo}(j\omega) \\ Y'(j\omega) &= Y'_{ext}(j\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

sendo: $Z'(j\omega) = R'(j\omega) + j\omega.L'(j\omega)$, a matriz impedância série (em Ω/km); $Y'(j\omega) = G' + j\omega.C'$, a matriz admitância em derivação (em S/km); $Z'_{int}(\omega)$ a impedância intrínseca dos condutores; $Z'_{ext}(\omega)$ a impedância devida à geometria; $Z'_{earth}(\omega)$ a impedância de retorno pelo solo (todas em Ω/km); e $Y'_{ext}(\omega)$ a admitância devida à geometria (em S/km). A impedância série e a admitância shunt de uma linha de transmissão, possuem forte dependência com a frequência, devido ao retorno pelo solo, efeito pelicular e acoplamento entre fases (2), (6), (7). As matrizes $Z'(j\omega)$ e $Y'(j\omega)$ são complexas, simétricas devido a geometria da linha e cheias devido ao acoplamento entre fases (8), (9), (10).

3.0 - MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dentre os modelos computacionais disponibilizados nos programas tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Programs*), as linhas de transmissão se destacam por duas particularidades: seus parâmetros são distribuídos ao longo de sua extensão e apresentam forte dependência da frequência (1), (2).

Devido a estas peculiaridades, as linhas de transmissão podem ser modeladas de diferentes formas, de acordo com a precisão e a eficiência necessárias (6), (7).

3.1 Principais Distinções entre os Modelos Computacionais

Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as linhas de transmissão podem ser representadas por modelos a parâmetros concentrados ou modelos a parâmetros distribuídos. Quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência, distinguem-se duas classes de modelos de linhas de transmissão: modelos a parâmetros constantes na frequência, e modelos a parâmetros dependentes da frequência.

Se a dependência dos parâmetros com a frequência é levada em consideração, tem-se um significativo acréscimo no esforço computacional associada a uma melhor representação do comportamento físico real (2).

Linhas de transmissão polifásicas, podem ainda ser modeladas no domínio modal ou no domínio de fases. Os modelos modais fazem uso da técnica da transformação modal (1), (2), (12), na qual através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha, as n fases de uma linha polifásica podem ser desacopladas em n linhas monofásicas independentes, facilitando o cálculo das solicitações transitórias.

Os modelos modais, propostos na década de 1960, têm grande utilização sendo largamente utilizados em estudos de transitórios eletromagnéticos.

São modelos bastante precisos no caso de linhas de transmissão aéreas simétricas, mas perdem em precisão, quando aplicados a linhas aéreas com alto grau de assimetria, linhas em configurações de circuitos múltiplos e cabos subterrâneos (2), (8), (9), (13).

Os modelos no domínio de fases surgiram a partir de meados da década de 1990, objetivando um modelo preciso e sem restrições. Apesar do grande interesse despertado, tais modelos ainda têm aplicação limitada, e poucos programas tipo EMTP os disponibilizam, a exemplo do ATP (4) e do PSCAD/EMTDC (5).

Estes recentes modelos se mostram precisos quando os modelos convencionais (modelos modais), da forma que estão implementados, se mostram limitados (2).

Os modelos no domínio de fases visam uma representação matemática sem restrições quanto à geometria ou natureza das linhas de transmissão.

Apesar dos recentes avanços no desenvolvimento de modelos para representação de linhas de transmissão, certamente os modelos mais utilizados nos estudos de transitórios eletromagnético no Brasil, têm sido os modelos modais, a parâmetros distribuídos e constantes na frequência.

Ao longo dos anos, estabeleceu-se um paradigma, no qual os modelos computacionais de linhas de transmissão a parâmetros constantes na frequência são "mais conservativos" em relação a outros modelos que representam com maior precisão o fenômeno físico da propagação de ondas, no caso os modelos a parâmetros dependentes com a frequência.

Além das razões técnicas, a exemplo do paradigma do modelo computacional "mais conservativo", e históricas, uma das maiores motivações para se fazer uso destes modelos reside no fato de que praticamente todo o Sistema Interligado Nacional (SIN) encontra-se modelado desta forma, o que demandaria um esforço significativo, caso se faça uma opção pela utilização de modelos computacionais mais recentes, e teoricamente mais precisos e/ou computacionalmente eficientes.

3.2 Modelos a Parâmetros Distribuídos Constantes na Frequência

Nos modelos a parâmetros distribuídos constantes na frequência, os parâmetros da linha são considerados distribuídos mas calculados em uma única frequência, por exemplo 60 Hz. Como consequência, na determinação das condições transitórias, os efeitos das possíveis componentes de frequência das ondas viajantes, sobre os parâmetros da linha são desprezados.

Uma particularidade destes modelos é a não consideração da condutância em derivação (ou *shunt*), G' , entre os parâmetros da linha (2), (4), (5).

3.3 Modelos a Parâmetros Distribuídos Dependentes com a Frequência

Nos modelos a parâmetros distribuídos dependentes da frequência, a dependência com a frequência e a natureza distribuída dos parâmetros da linha de transmissão, são levados em consideração.

O modelo dependente da frequência proposto por J. Martí (14), é seguramente um dos mais difundidos e utilizados, sendo disponível nos principais programas tipo EMTP (3), (4), (5).

4.0 - RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A abertura de uma linha de transmissão sob falta, devido a um curto-circuito temporário, seguida do seu religamento automático, pode ser vista como uma alternativa de grande valia para a operação de um sistema elétrico de potência, uma vez que tal possibilidade pode assegurar uma operação sem interrupções no fornecimento de energia elétrica, quando se trata de um sistema redundante, sem maiores repercussões para o sistema como um todo.

Por isso, o religamento automático, seja monopolar ou trifásico, está sendo exigido atualmente em todas as licitações (leilões) da ANEEL para as novas linhas de transmissão que venham a ser agregadas à Rede Básica.

O religamento automático de linhas de transmissão apresenta vantagens e limitações.

O religamento monopolar é uma medida de proteção que concorre para o aumento das margens de estabilidade de sistemas elétricos, ensejando uma menor vulnerabilidade do sistema devido a defeitos transitórios monofásicos fase-terra. Esta vantagem é importante quando o sistema opera em condições degradadas, embora não seja muito importante na primeira contingência quando o sistema é projetado para suportar falta fase-terra permanente. A característica supracitada está associada à continuidade parcial do fluxo de energia pelas fases sãs durante o defeito monofásico.

O emprego do religamento monopolar conduz a maior confiabilidade na operação do sistema, especialmente em casos de dupla contingência caracterizados por defeito monofásico numa linha seguida pela saída de outra linha por erro de proteção, pois ambas as linhas poderão ser religadas com sucesso.

Também, no caso de manutenção de linhas (condição N-1 de longa duração) o aumento da confiabilidade será significativo, se as linhas próximas estiverem com o religamento monopolar habilitado.

A abertura monopolar com religamento rápido concorre para atenuar eventuais problemas de afundamento de tensão (VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração ou *voltage sags*) pós-defeito, diminuindo a probabilidade de instabilidade de tensão e de desligamento de unidades geradoras.

O religamento monopolar contribui ainda para redução das sobretensões de manobra, aumentando a vida útil dos disjuntores, além de aumentar a confiabilidade do suprimento de energia elétrica, especialmente em sistemas radiais.

O religamento tripolar apresenta algumas das vantagens descritas acima, sendo mais limitante caso a linha a ser religada seja única em um sistema radial.

A decisão sobre a adoção do religamento automático deve ter como base a natureza probabilística dos defeitos fase-terra.

Comprovadamente, a maioria dos defeitos em sistemas de transmissão de extra alta tensão, são do tipo fase-terra e de natureza transitória. Entretanto, alguns circuitos podem apresentar uma elevada incidência de defeitos permanentes, especialmente quando a faixa de passagem inclui áreas com florestas densas. Nestes casos, pode não ser recomendável a adoção do religamento, pelo menos inicialmente. A adoção do religamento monopolar deve pressupor uma elevada probabilidade de extinção da corrente de arco secundário

Na contrapartida das vantagens, o religamento automático pode resultar em redução de vida útil dos eixos das turbinas a vapor. Portanto, nos casos de aplicação do religamento em circuitos nas vizinhanças de usinas térmicas de grande porte, é necessário realizar um estudo dos conjugados elétricos transitórios aplicados aos sistemas de rotores destas unidades, quando excitados pela seqüência de chaveamentos. Estes estudos requerem informações detalhadas das características físicas e geométricas dos eixos, distribuição das inércias, e o emprego de pacotes de simulação de transitórios eletromagnéticos.

Para o caso específico das modernas usinas térmicas com ciclo combinado – turbinas a gás e turbinas a vapor – de médio porte, a análise da redução de vida útil dos eixos por efeito dos torques resultantes do religamento em circuitos vizinhos, deve receber uma atenção especial.

Em geral, parece conveniente exigir que novas usinas (térmicas, eólicas etc) devam suportar sem restrições, pelo menos, o religamento monopolar das linhas próximas, para não prejudicar a confiabilidade do SIN.

Em alguns países está sendo especificado que as novas usinas térmicas devam suportar qualquer tipo de religamento necessário para que se mantenha a confiabilidade da rede.

Em alguns sistemas de transmissão dotados de circuitos múltiplos, caracterizados freqüentemente por linhas com faixas de passagens comuns ou muito próximas, dispostas nos chamados “corredores de potência”, pode ser inviável, sob o ponto de vista prático, a adoção do religamento, devido à dificuldade de extinção da corrente de arco secundário, a qual será alimentada pelos acoplamentos com circuitos vizinhos.

No presente trabalho, dedica-se a atenção ao religamento tripolar em sistemas de 230kV, nos quais teoricamente se pressupõe uma elevada probabilidade de extinção da corrente de arco secundário, e portanto não se faz uma representação mais precisa do arco secundário.

5.0 - LINHA DE TRANSMISSÃO VILA DO CONDE – SANTA MARIA 230kV: RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

O diagrama unifilar com a configuração do sistema em estudo é apresentado na Figura 2. Visando restringir a modelagem do sistema à área de interesse, o sistema em 500kV é representado por um equivalente na SE Tucuruí 500kV.

A entrada em operação da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV, representa um ganho em confiabilidade no suprimento das cargas da região, além de ampliar a capacidade de transmissão para a SE Santa Maria. Para tanto, faz-se necessário definir os procedimentos para energização, religamento automático e operação da referida linha de transmissão, bem como avaliar a recomposição da SE Santa Maria 230kV por esta nova rota.

A referida linha de transmissão tem como particularidade o fato de ser descontínua nas suas características construtivas, e portanto, nos seus parâmetros elétricos. A linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV é uma Linha de Potência Natural Elevada (LPNE, com uma capacitância elevada) em cerca de 80% da sua extensão de 154,95km, a partir da SE Vila do Conde, sendo uma linha convencional nos 20% restantes. Esta configuração foi adotada visando a entrada em operação de uma subestação (SE Castanhal) neste ponto de descontinuidade no ano de 2010.

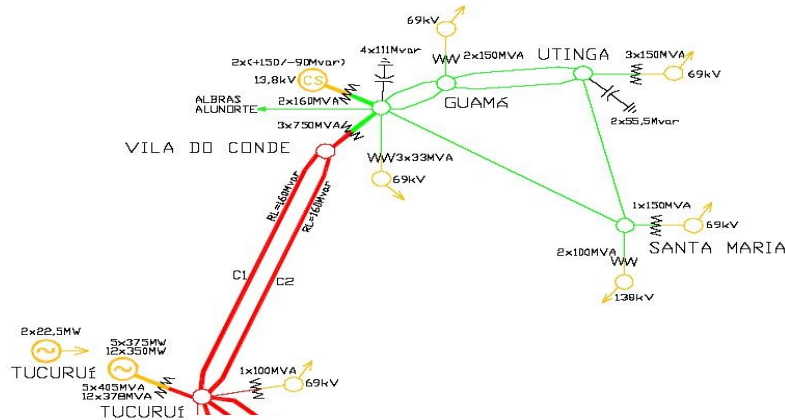


FIGURA 2 – Diagrama unifilar do sistema em estudo. Área Pará, Sistema Norte do Sistema Interligado Nacional (SIN)

5.1 Premissas Básicas

Especificamente no que se refere ao estudo de religamento automático, tem-se como premissas:

- Área Pará em carga mínima;
- Ativação do esquema de religamento automático apenas após a ocorrência de faltas na linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV;
- Bancos de capacitores das SE Vila do Conde e Utinga, e compensadores síncronos (CS) da SE Vila do Conde, em operação de acordo com as premissas para controle de tensão, estabelecidas nos estudos de regime permanente.
- Circuito 230kV Vila do Conde – Guamá – Utinga – Santa Maria em operação normal.

5.2 Religamento Tripolar, com sucesso, da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV, após uma Falta Monofásica. Terminal Líder: Vila do Conde

A título de comparação, a linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV foi modelada de duas formas distintas: um modelo a parâmetros constantes na frequência (modelo CF) e um segundo modelo a parâmetros dependentes com a frequência (modelo DF).

Inicialmente, considera-se a abertura nos terminais da linha na SE Vila do Conde, sob falta (fase A para terra, no máximo da tensão), com transferência de disparo (*transfer trip*) para a SE Santa Maria. Quando do religamento, considera-se como terminal líder, o terminal da SE Vila do Conde.

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos no estudo estatístico, simula-se o religamento tripolar com sucesso da LT Vila do Conde – Santa Maria 230kV.

Os resultados obtidos com os dois modelos em análise são apresentados nas figuras 3 e 4, sendo: CF = Modelo teoricamente mais conservativo; DF = Modelo teoricamente menos conservativo.

Observa-se uma significativa distinção nas tensões transitórias nos terminais da linha em aberto quando do religamento do terminal líder, ao se utilizar os modelos distintos (CF e DF).

No caso do uso do modelo CF verifica-se uma superação de 1,0% do Nível Básico de Isolamento para Surtos de Manobra (NBI ou *Basic Switching Impulse Insulation Level* – BSL), cujo valor máximo usualmente adotado é de 4,0 pu (ou 750,0kV para sistemas 230kV). Ao se utilizar o modelo DF, verifica-se uma redução significativa nas sobretensões, se mostrando 35,0% inferior ao NBI. A diferença observada entre os dois valores máximos é de 36% (ou 270kV).

Na representação da linha de transmissão, os modelos a parâmetros constantes na frequência (CF) não consideram a condutância em derivação (ou *shunt*, componente real da admitância em derivação), uma vez que apenas a impedância série (resistências e reatâncias) e a capacitância em derivação (componente imaginária da admitância em derivação) são consideradas (11), (12).

Uma consequência direta da não representação da condutância, pode ser verificada nos resultados das simulações (vide Figura 3), quando após a abertura dos terminais da linha em estudo, a carga residual se mantém constante, independente do “tempo morto” adotado na estratégia de religamento, sendo a linha de transmissão representada neste momento por um capacitor ideal. Ao considerar a linha de transmissão como um capacitor ideal, tem-se uma amplificação das sobretensões nos terminais desta quando do religamento, em virtude de não haver redução na carga residual durante o “tempo morto” (11).

Ao considerar a condutância em derivação, G' , o modelo DF reproduz com mais precisão o amortecimento da carga residual na linha.

Na prática, é notório que a carga residual de uma linha de transmissão em aberto sofre um amortecimento significativo durante um tempo de 5,0 s, mesmo em se tratando de uma linha LPNE.

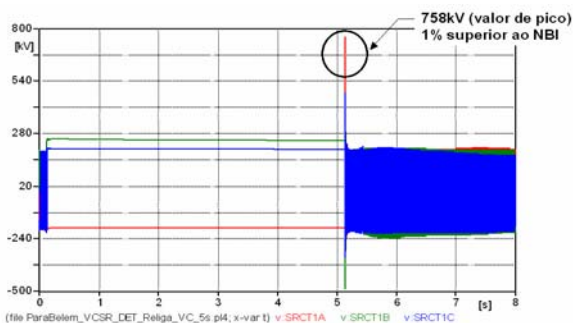


FIGURA 3 – Tensões transitórias nos terminais da linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV, em Santa Maria – Tempo morto: 5,0s – Modelo a parâmetros distribuídos constantes na frequência (CF).

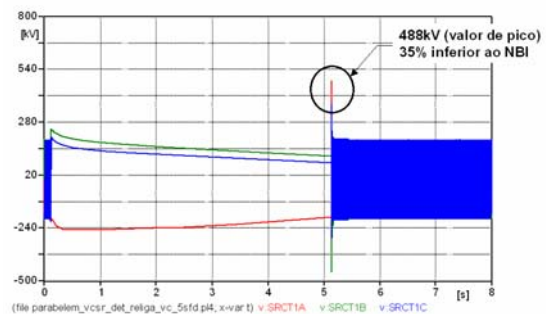


FIGURA 4 – Tensões transitórias nos terminais da linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV, em Santa Maria – Tempo morto: 5,0s – Modelo a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência (DF).

5.3 Religamento Tripolar, sem sucesso, da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV, após uma Falta Monofásica. Terminal Líder: Vila do Conde

Agora, considera-se a abertura nos terminais da linha na SE Vila do Conde, sob falta (fase A para terra, no máximo da tensão), com transferência de disparo (*transfer trip*) para a SE Santa Maria. Quando do religamento, considera-se como terminal líder, o terminal da SE Vila do Conde.

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos no estudo estatístico, simula-se o religamento tripolar sem sucesso da LT Vila do Conde – Santa Maria 230kV.

A seqüência de eventos simulada é apresentada na Figura 5.

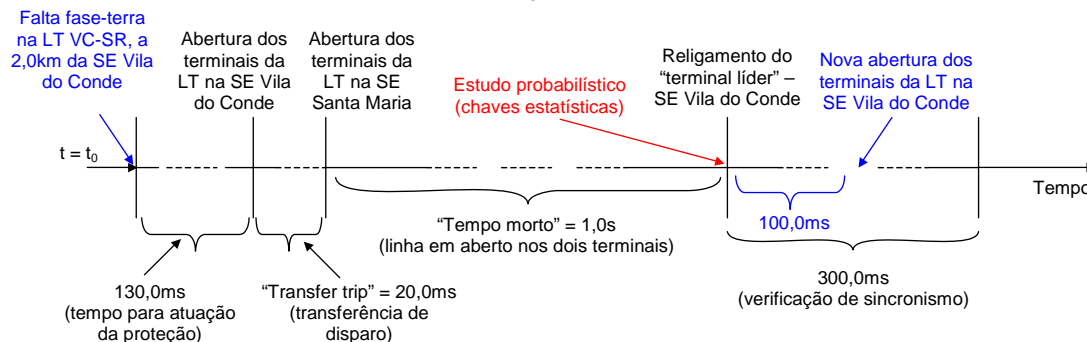


FIGURA 5 – Seqüência de eventos quando da abertura, sob falta, seguida de religamento sem sucesso da LT Vila do Conde – Santa Maria 230kV.

Os resultados obtidos com os dois modelos em análise são apresentados nas figuras 6 a 9, sendo: CF = Modelo teoricamente mais conservativo; DF = Modelo teoricamente menos conservativo.

Na Figura 6 são apresentadas as tensões transitórias nos terminais em aberto da linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV, em Santa Maria, durante o procedimento de religamento. Verifica-se que a linha representada pelo modelo CF se comporta como um capacitor ideal durante o “tempo morto”, enquanto que no modelo DF tem-se um amortecimento da carga residual da linha de transmissão, resultando em valores significativamente distintos para as sobretensões quando do religamento do terminal líder. Destaca-se o maior valor verificado inicialmente para a carga residual no caso do modelo DF, indo de encontro ao paradigma de este ser um modelo teoricamente “menos conservativo”.

Sob o ponto de vista sistêmico, um estudo de religamento automático deve necessariamente verificar as repercussões deste nas instalações e equipamentos pertencentes a mesma região geoeletrica. Para tanto, nas

figuras 7 a 9 são apresentadas as correntes transitórias de armadura do compensador síncrono (CS) CS6-01, 230kV da SE Vila do Conde.

Na Figura 7 apresentam-se as correntes observadas quando da aplicação da falta e do religamento da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV. Observam-se maiores valores para as correntes quando do religamento se comparadas à aplicação da falta. Na Figura 8 apresentam-se, de forma detalhada, as correntes de armadura do CS, obtidas com os modelos CF e DF, quando da aplicação de uma falta fase-terra nas proximidades da SE Vila do Conde. Conforme pode ser observado, nesta condição os resultados obtidos com os dois modelos em análise são coincidentes.

Na Figura 9 apresentam-se as correntes, de forma detalhada, observadas quando do religamento da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV. Neste caso, os resultados obtidos com os dois modelos em análise diferem consideravelmente. Observa-se uma diferença de até 8,0kA nas correntes de armadura, quando comparados os resultados da Figura 9.

Ainda na Figura 9, destacam-se os maiores valores verificados para as correntes de armadura do CS no caso do modelo DF, mais uma vez indo de encontro ao paradigma de este ser um modelo teoricamente “menos conservativo”.

São notórias as distinções nos resultados em função do modelo computacional utilizado para a representação da linha de transmissão.

Ao contrário do que teoricamente se possa esperar, os resultados obtidos com o modelo DF se mostraram “mais conservativos” quando comparados aos obtidos com o modelo CF (teoricamente tido como “mais conservativo”). Mostra-se portanto, que o conceito de modelo computacional “mais conservativo” é relativo, e não absoluto, sendo dependente da condição transitória em estudo, bem como da modelagem dos diversos componentes do sistema elétrico sob investigação.

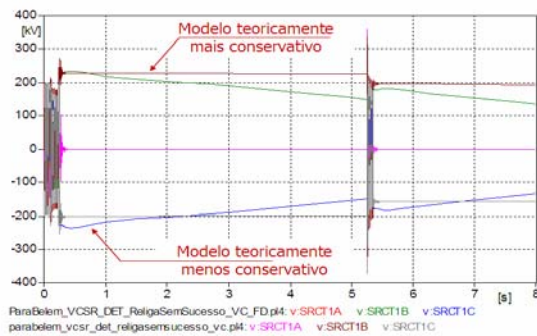


FIGURA 6 – Tensões transitórias nos terminais da linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV, em Santa Maria– Tempo morto: 5,0s - Modelo a parâmetros distribuídos constantes na frequência e modelo a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência.

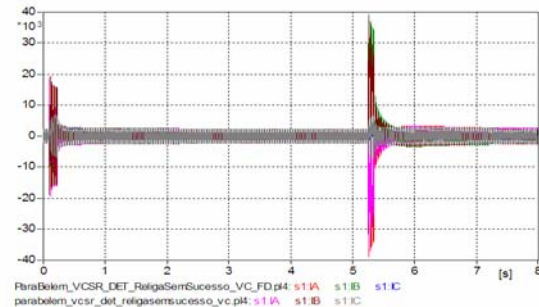


FIGURA 7 – Correntes de armadura do compensador síncrono CS6-01, 230kV da SE Vila do Conde – Tempo morto: 5,0s - Modelo a parâmetros distribuídos constantes na frequência e modelo a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência.

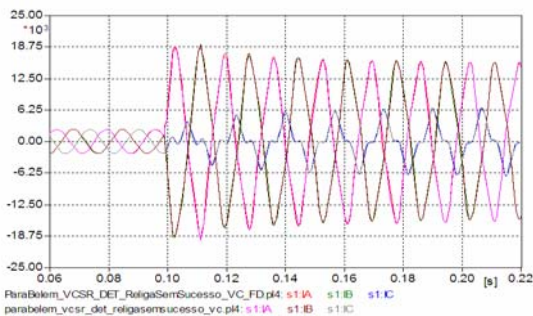


FIGURA 8 – Correntes de armadura do compensador síncrono CS6-01, 230kV da SE Vila do Conde durante a falta fase-terra na SE Vila do Conde – Modelo a parâmetros distribuídos constantes na frequência e modelo a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência.

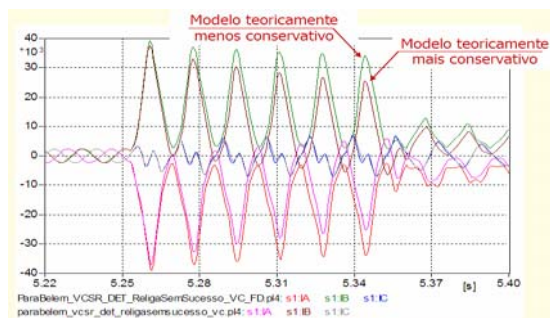


FIGURA 9 – Correntes de armadura do compensador síncrono CS6-01, 230kV da SE Vila do Conde quando do religamento do terminal líder – Tempo morto: 5,0s - Modelo a parâmetros distribuídos constantes na frequência e modelo a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência.

6.0 - CONCLUSÕES

No presente trabalho, faz-se uma análise quanto a possíveis distinções nos resultados de um estudo de religamento automático de linhas de transmissão em função do modelo computacional utilizado. Para tanto, as linhas de transmissão foram modeladas como sendo a parâmetros distribuídos constantes na frequência (CF) e a parâmetros dependentes com a frequência (DF).

Na representação da linha de transmissão os modelos a parâmetros constantes na frequência não consideram a condutância em derivação (ou *shunt*, componente real da admitância em derivação), uma vez que apenas a impedância série (resistências e reatâncias) e a capacitância em derivação (componente imaginária da admitância em derivação) são consideradas.

Uma consequência direta da não representação da condutância, pode ser verificada em estudos de religamento (tripolar ou monopolar), quando após a abertura dos terminais da linha em estudo, a carga residual se mantém constante, independente do “tempo morto” adotado na estratégia de religamento, sendo a linha de transmissão representada neste momento por um capacitor ideal.

Ao considerar a linha de transmissão como um capacitor ideal, tem-se uma amplificação das sobretensões nos terminais desta quando do religamento, em virtude de não haver redução na carga residual durante o “tempo morto”.

Nos religamentos com ou sem sucesso, os resultados obtidos se mostraram inferiores aos limites de suportabilidade para: as correntes de fase nos bancos de capacitores 111,0Mvar, 230kV, da SE Vila do Conde; as correntes de armadura nos compensadores síncronos +150/-90Mvar, 13,8kV, da SE Vila do Conde; e a capacidade de absorção de energia dos pára-raios nos terminais da LT Vila do Conde – Santa Maria 230kV. No entanto, ao se fazer uso dos modelos CF e DF as diferenças entre os resultados são significativas, especialmente para os compensadores síncronos (CS) da SE Vila do Conde 230kV.

Por tudo isso, são notórias as distinções nos resultados em função do modelo computacional utilizado para a representação da linha de transmissão.

Sob o ponto de vista sistêmico, um estudo de religamento automático deve necessariamente verificar as repercussões deste nas instalações e equipamentos pertencentes a mesma região geoeletrica.

Ao contrário do que teoricamente se possa esperar, os resultados obtidos com o modelo DF se mostraram “mais conservativos” quando comparados aos obtidos com o modelo CF, tido teoricamente como sendo “mais conservativo”.

Mostra-se portanto, que o conceito de modelo computacional “mais conservativo” é relativo, e não absoluto, sendo dependente da condição transitória em estudo, bem como da modelagem dos diversos componentes do sistema elétrico sob investigação.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dommel, H. W., Electromagnetic Transients Program Reference Manual, Vancouver: Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Canada, 2004.
- (2) Fernandes, A. B., Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 2001.
- (3) Microtran Power System Analysis Corporation, Transients Analysis Program Reference Manual. Vancouver, 1992.
- (4) Leuven EMTP Center, ATP - Alternative Transient Program - Rule Book, Herverlee, Belgium, 1987.
- (5) Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD/EMTDC Simulation Program - V3.8 Personal Edition, Winnipeg, Canada, 2004.
- (6) CIGRÉ Working Group 33.02, Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients, Technical Brochure CE/SC GT/WG 02, 1990.
- (7) IEEE Working Group 15.08.09, Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- (8) Morched, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, Iss. 3, pp. 1032-1038, July 1999.
- (9) Gustavsen, B., Irwin, G., Mangelrod, R., Brandt, D., Kent, K., Transmission Line Models for the Simulation of Interaction Phenomena between AC and DC Overhead Lines. Proceedings of the IPST'99 - International Conference on Power Systems Transients, Budapest, Hungary, pp. 61-67, June 1999.
- (10) Fernandes, A. B., Neves, W. L. A., Costa E. G., Cavalcanti, M. N., Transmission Line Shunt Conductance from Measurements, IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Periodicals, Vol. 19, No. 2, pp. 722-728, April 2004.
- (11) Fernandes, A. B., Neves, W. L. A., Phase-Domain Transmission Line Models Considering Frequency-Dependent Transformation Matrices, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 708-714, April 2004.
- (12) Wedepohl, L. M., Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase Systems, Proc. IEE, Vol. 110, No. 12, pp. 2200-2212, 1963.
- (13) Noda, T., Nagaoka, N., Ametani, A., Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Model in Terms of Convolution, Steady-State Initialization, and Stability. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No.3, pp. 1327-1334, July 1997.
- (14) Martí, J. R., Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1, pp. 147-157, January 1982.