



GSC/018

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

SIMULAÇÃO DA RESPOSTA AO TRANSITÓRIO DE CHAVEAMENTO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA USANDO O PSPICE

Ruth P.S. Leão
rleao@gpec.ufc.br
Universidade Federal do Ceará

Ivo Carvalho de Albuquerque
ivo@roadnet.com.br
Universidade Federal do Ceará

RESUMO

O sistema elétrico é formado por um conjunto de elementos que interagem entre si, os quais estão sujeitos a mudanças em suas condições de operação. Quando as mudanças em um sistema elétrico são decorrentes de distúrbios transitórios, a resposta do sistema ao distúrbio se manifesta, em geral, por uma elevação na tensão e na corrente cuja magnitude pode ser várias vezes maior do que o correspondente valor nominal. Este artigo tem como objetivo aplicar o programa PSPICE na simulação de resposta a transitórios impulsivos e oscilatórios. Várias situações de interesse são simuladas como: chaveamento de banco de capacitores, energização de linhas em diferentes condições de carga, religamento automático de linhas, e chaveamento de reatores shunt.

PALAVRAS-CHAVE: Transitórios Impulsivos, Transitórios Oscilatórios, Simulação Computacional, PSPICE.

1.0 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico está sujeito a transitórios eletromagnéticos cada vez em que ocorrem chaveamentos de natureza normal e anormal. Quando as mudanças em um sistema elétrico são decorrentes de distúrbios transitórios, a resposta do sistema ao distúrbio se manifesta, em geral, por uma elevação na magnitude da tensão e/ou corrente que pode ser várias vezes maior do que o correspondente valor nominal, com uma duração menor do que poucos ciclos (<50ms).

Os transitórios de tensão e corrente são classificados como impulsivos e oscilatórios. Os termos impulsivos

e oscilatórios refletem a forma de onda da tensão e corrente transitória. Os transitórios se apresentam como a categoria de perturbação responsável pela maioria dos desligamentos não programados, acarretando prejuízos pela danificação de equipamentos e interrupção no suprimento de energia.

A demanda por uma energia elétrica confiável tem crescido à medida em que a eletricidade apresenta-se como um bem essencial e indissociável para a sociedade contemporânea. A competitividade entre as empresas de energia elétrica, a sensibilidade das cargas às variações de tensão, a satisfação do consumidor, a preocupação com a reputação e imagem da empresa, são razões, dentre outras não menos importantes, que concorrem para que os transitórios possam ser estudados.

Este artigo tem como objetivo aplicar o programa PSPICE V.8 na simulação da resposta do sistema de potência quando submetido a transitórios de chaveamento. A aplicação do PSPICE, por seu uso difundido na engenharia elétrica, permite ao profissional e ao aluno da área de sistemas de potência entender as características dos transitórios, os efeitos sobre os sistemas e avaliar a importância de soluções mitigadoras, melhor capacitando o profissional quanto a qualidade da energia.

As principais situações de interesse simuladas são:, chaveamento controlado de linhas longas em condição de carga e a vazio, religamento automático de linhas, energização de bancos de capacitores e chaveamento de reatores shunt.

2.0 TRANSITÓRIOS IMPULSIVOS E OSCILATÓRIOS

Um distúrbio transitório denota um evento que é indesejável, de grande amplitude e curta duração, sobreposto à onda normal de tensão e corrente. O transitório resulta de uma rápida liberação de energia armazenada nos indutores e capacitores presentes no sistema elétrico ou em uma nuvem carregada.

Sob condições permanentes a energia armazenada nos elementos L e C oscilam entre a indutância e a capacitância na frequência industrial. Quando há uma súbita mudança no circuito, tal como um chaveamento, ou uma falta, a redistribuição de energia acontece para acomodar a nova condição do sistema. Esta redistribuição de energia não pode acontecer instantaneamente porque a corrente no indutor e a tensão no capacitor não variam instantaneamente (1).

Os transitórios contém altas frequências quando comparadas à frequência industrial. As altas frequências presentes em um transitório impulsivo podem excitar a frequência natural do sistema elétrico, de modo que a forma de onda do transitório impulsivo pode vir a mudar rapidamente em transitório oscilatório. Os transitórios impulsivos são basicamente de origem externa tendo como principal causa as descargas atmosféricas (2). A Figura 1 mostra a forma de onda de um transitório unipolar impulsivo de tensão.

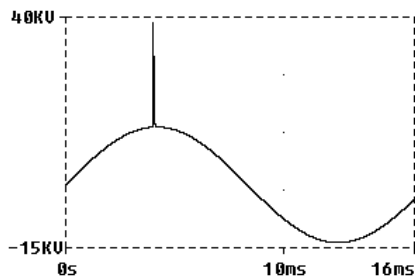


Figura 1 - Transitório Impulsivo de Tensão de Onda Padrão de $1.2 \times 50 \mu s$

Nos transitórios oscilatórios, como mostra a Figura 2, as polaridades positiva e negativa da onda mudam rapidamente. O conteúdo espectral de um transitório oscilatório pode ser dividido em oscilação de alta (0,5-5MHz), média (5-500kHz) e baixa frequência (<5kHz). As faixas de frequências de cada sub-classe de espectro definem o tipo de perturbação a que foi submetido o sistema de potência.

Os transitórios oscilatórios cuja frequência principal é alta são típicos de resposta do sistema no ponto de incidência de um transitório impulsivo. Os transitórios de média e baixa frequência são tipicamente de origem interna, causados por manobras de chaveamento.

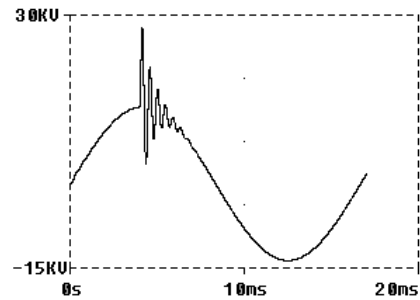


Figura 2 - Transitório Oscilatório de Tensão devido ao Chaveamento de Capacitores

A seguir serão apresentados os resultados de simulação de operação de chaveamento em sistemas de potência.

2.1 Chaveamento de Linha de Transmissão

O chaveamento de uma linha de transmissão de 230kV, 60Hz, representada por dois circuitos Pi em série, foi estudado sob diferentes condições de operação. Na simulação foi representado energização e desenergização da linha a vazio e sob condição de carga. O chaveamento da linha foi simulado para valores de tensão zero e máximo. O transitório de tensão foi obtido no terminal transmissor, receptor e no meio da linha.

Dentre as simulações realizadas será mostrado a resposta do sistema durante: (1) a energização da linha sem carga, seguida da inserção da carga; (2) a desenergização da linha com carga. Para as duas condições, o chaveamento será feito quando a tensão passa pelo zero e quando está em seu valor máximo.

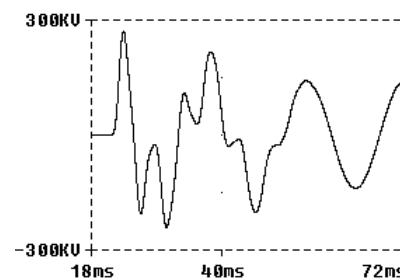


Figura 3 - Tensão no Receptor durante Energização de Linha a Vazio

A Figura 3 mostra a tensão no receptor quando a linha é energizada no instante em que a magnitude da tensão da fonte é máxima ($t=20.83ms$). A inserção da carga é feita em $t=50ms$. A tensão atinge 1,8pu do valor da tensão no instante do chaveamento. Quando a linha é energizada quando a tensão passa pelo zero, o transitório atinge 1,24pu.

A forma de onda da tensão durante a desconexão da carga da linha de 230kV, no instante em que a tensão

da fonte passa pelo máximo, é apresentada na Figura 4. A tensão da linha oscila em torno de seu valor máximo.

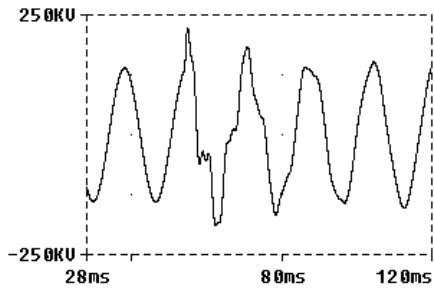


Figura 4 – Tensão Transitória durante Abertura da Linha sob Carga

Quando a carga é desconectada estando a linha em regime permanente, as tensões aumentam em até 1,5pu e se estabilizam em torno de 1,05pu. Para desconexão em $V=0$ a tensão atinge cerca de 1.15pu e se estabiliza nos mesmos 5% acima da tensão inicial.

Pode-se verificar a influência do instante em que ocorre o chaveamento sobre o valor da tensão transitória, sendo em $V=0$ a condição menos exigente.

2.2 Religamento Automático

Muitas das faltas nos sistemas de potência são de natureza transitória podendo desaparecer após a desconexão temporária da seção em falta. Os disjuntores e religadores automáticos religam, se necessário, três ou quatro vezes em seqüência rápida com atuação instantânea e temporária.

A Figura 5 apresenta o circuito da linha, descrita no item 2.1, sob condição de falta nos terminais da carga. As chaves t_{Open} e t_{Close} representam chaves normalmente fechadas e normalmente abertas, respectivamente. Uma seqüência de chaveamento será investigada. Os tempos de abertura e fechamento das chaves mostrados na Figura 5 são contados a partir de um tempo $t=0$, instante este que corresponde a energização da linha.

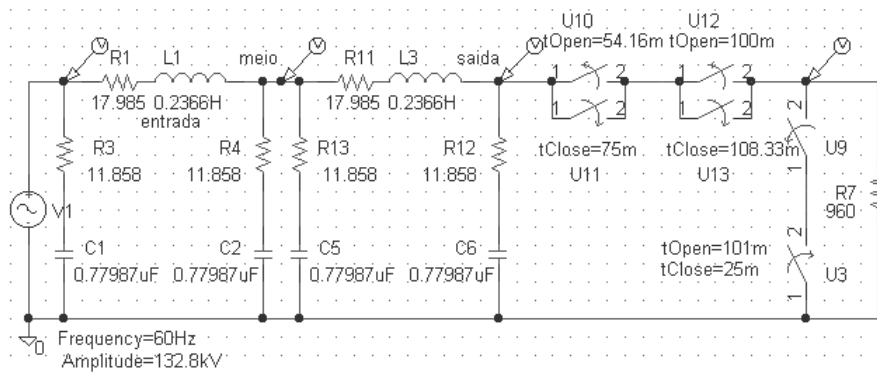


Figura 5 – Circuito de LT em Curto-Circuito com Religamento Automático

Em $t_{Close}=25ms$, quando a linha atinge o regime permanente, um curto é aplicado no terminal receptor. Em $t_{Open}=54,16ms$ a falta é eliminada e a abertura dos contatos se dá em $V=V_{MAX}$. Para $t_{Close}=75ms$ é feita o religamento da linha. O curto ainda está presente e a chave $t_{Open}=100ms$ abre novamente a linha, em $V=0$. O curto circuito cessa em $t_{Open}=101ms$ e o religador volta a atuar em $t_{Close}=108,33ms$ conectando de volta a carga à linha. A Figura 6 mostra a tensão no receptor para a condição descrita.

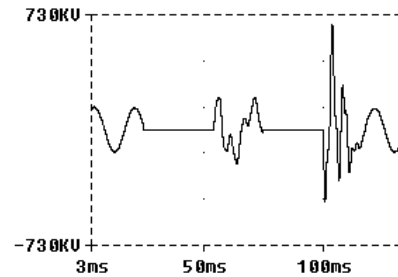


Figura 6 – Tensão no Receptor durante Seqüência de Manobra

A curva no centro da Figura 6, desconexão da linha em curto circuito ($t_{Open}=54,16ms$), apresenta transitório de tensão da ordem de 1,5pu. No instante da segunda desconexão da linha em 100ms ($V=0$), o transitório alcança um valor próximo de 5pu. A curva mais a direita na Figura 6 mostra a expressiva amplitude da oscilação quando a desconexão é feita em $V=0$. Consideração semelhante pode ser feita para os gráficos de corrente.

A corrente de curto circuito com valores impulsivos e oscilatórios, e a corrente drenada pela fonte são mostradas nas Figuras 7 e 8.

O religamento automático é considerado com êxito se a falta é eliminada pela desconexão do circuito ou fase e a condição de operação normal é alcançada após o chaveamento.

2.1 Chaveamento de Banco de Capacitores

O chaveamento de capacitores é um dos eventos mais comuns em concessionárias de energia. A energização de capacitores pode produzir transitórios oscilatórios. A oscilação da tensão ocorre na frequência natural do sistema.

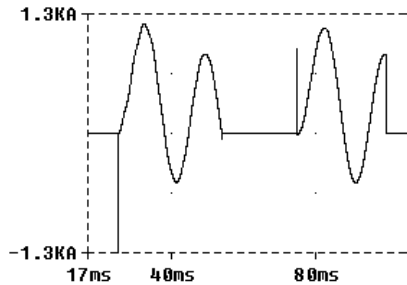


Figura 7 – Corrente de Curto Circuito

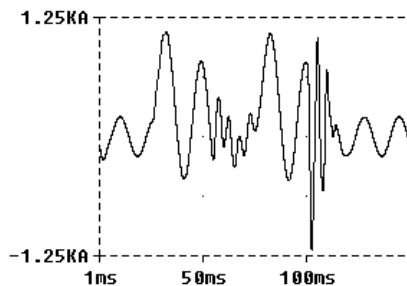


Figura 8 – Corrente Drenada da Fonte durante o Religamento

O transitório de tensão pode variar entre 1,0 e 2,0 pu dependendo das condições de amortecimento do sistema. Embora os transitórios até 2,0pu não são em geral danosos à isolamento do sistema, a ocorrência de tais transitórios podem muitas vezes causar a má operação de dispositivos de conversão eletrônica de potência [2].

A Figura 9 apresenta um alimentador de distribuição em 13,8kV onde será avaliado o efeito de energização de capacitor.

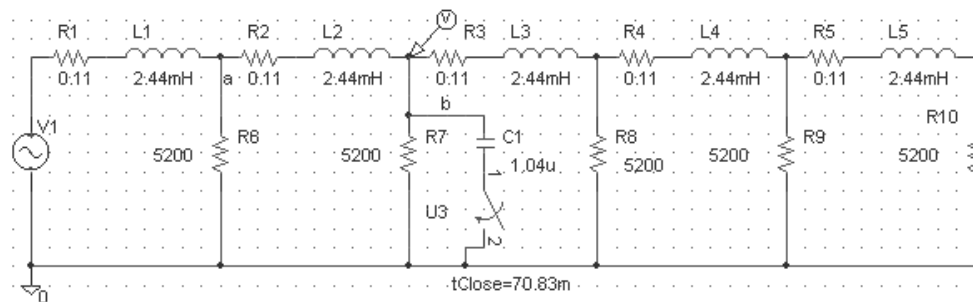


Figura 9 – Alimentador Primário de Distribuição com Conexão de Capacitor

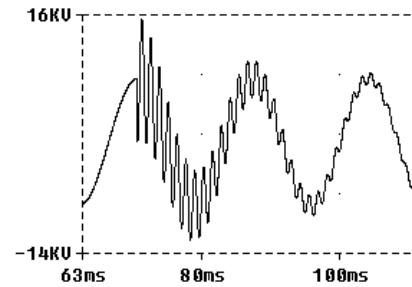


Figura 10 – Transitório de Energização de Capacitor

A Figura 10 mostra o transitório oscilatório no barramento em que é energizado um banco de capacitores com $C=8,35\mu\text{F}$. A corrente no capacitor é mostrada na Figura 11.

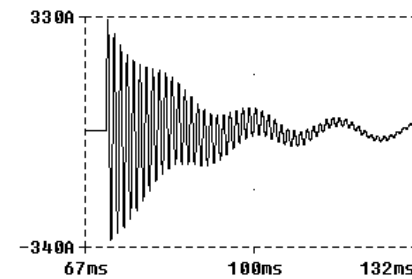


Figura 11 – Corrente no Capacitor

A curva da corrente eficaz drenada pela fonte durante a energização do capacitor é mostrada na Figura 12.

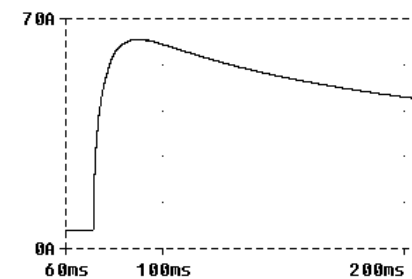


Figura 12 – Valor RMS da Corrente na Fonte durante Energização de Capacitor

A varredura em frequência para o circuito mostrado na Figura 9, com o capacitor no circuito é mostrada na Figura 13. A frequência natural do circuito é de 787Hz. O espectro de frequência da tensão mostrada na Figura 10 é visto na Figura 14. Pode-se notar que a frequência dominante, afora a de 60Hz, coincide com a frequência natural do sistema.

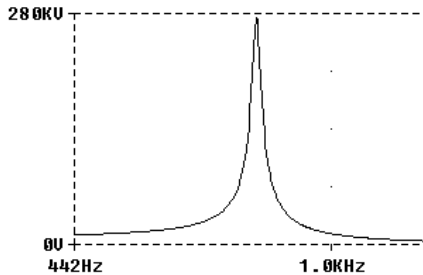


Figura 13 – Varredura em Frequência da Linha de Distribuição

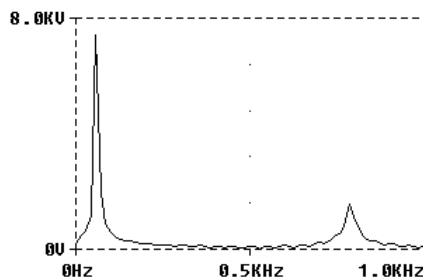


Figura 14 – Espectro de Frequência da Tensão

2.3 Reatores Shunt

Compensação reativa shunt é muitas vezes aplicada em ambos terminais de uma linha de transmissão longa para limitar a tensão em circuito aberto. Quando uma linha é energizada ou desenergizada, os disjuntores nos dois terminais da linha não operam extamente ao mesmo tempo. Na verdade, o disjuntor em um terminal de uma linha pode ser intencionalmente fechado antes do outro terminal. Quando um disjuntor fecha, a linha é radial de um terminal, e a susceptância shunt distribuída da linha pode causar a tensão no lado aberto crescer a níveis inaceitáveis. A adição de compensação shunt na forma de reatores shunt de dimensão apropriada em ambos os terminais da linha limitará a tensão de circuito aberto a níveis desejados (3).

Na Figura 15 uma linha longa, não compensada, de 500km, 60Hz e 500kV, representada pelo Pi Equivalente com parâmetros $Z=8,065+j173,754\Omega$ e $Y/2=2,11878 +j1159,022\mu S$, é energizada em vazio. A tensão no terminal receptor atinge 1,25pu devido ao Efeito Ferranti na linha. Em $t_{Close}=300ms$ um reator shunt igual a $884\mu S$ é conectado ao terminal receptor da linha. A tensão do receptor a vazio com a entrada do compensador cai para 1,05pu.

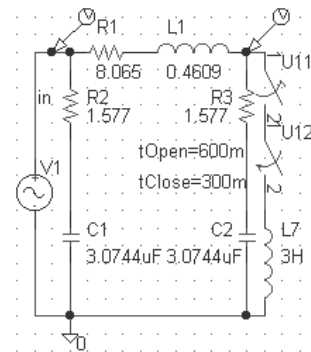


Figura 15 – Linha de Transmissão Longa

O transitório de tensão durante a energização da linha é igual a 1,16pu quando o chaveamento ocorre no momento em que a tensão da fonte é máxima, e 1.08pu quando a tensão da fonte passa pelo zero.

A desenergização do reator shunt em $V=0$ produz um transitório oscilatório de tensão de 1,46pu, alcançando o regime permanente em 1,25pu que é a condição da linha não compensada em vazio mostrada acima. Quando o reator shunt é desenergizado em $V=V_{MAX}$, o transitório de tensão é de 1,43pu e a tensão em regime igual a 1,25pu.

A Figura 15 mostra a tensão linha-neutro durante a desenergização do reator shunt, em $t_{Open}=600ms$.

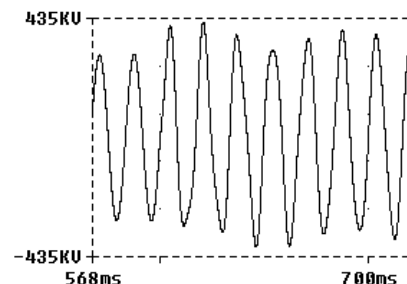


Figura 15 – Tensão Linha-Neutro durante Desenergização de Reator Shunt em Linha de 500kV

3.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o resultado de simulação computacional em que mostra a resposta do sistema elétrico a operação de chaveamento controlado em linhas de transmissão com carga e a vazio, religamento de linhas de transmissão, energização de banco de capacitores, e energização e desenergização de reatores shunt, utilizando o software PSPICE.

O PSPICE é uma ferramenta computacional poderosa, de fácil uso, com interface gráfica amigável, mas de uso difundido na área de eletrônica. O uso do PSPICE na simulação de transitórios de chaveamento em sistemas de potência permite a visualização dos efeitos dos transitórios contribuindo para uma melhor

compreensão e um fácil aprendizado do fenômeno. O PSPICE permite uma análise no tempo e no domínio da frequência.

4.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) IEEE Std. 399-1990. **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis** - Brown Book. IEEE Press. EUA. 4th Printing, 1997. 384p. ISBN 1-55937-044-0.
- (2) DUGAN, R.C., McGRANAGHAM, M.F., BEATY, H.W. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill. EUA. 1996. 265p. ISBN 0-07-018031-8.
- (3) ANDERSON, P.M., FARMER, R.G. **Series Compensation of Power Systems**. PBLSH! Inc. 1996. 559p. ISBN 1-888747-01-3.

5.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Ruth Pastôra Saraiva Leão, formada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará em 1978 e em Administração de Empresas, pela Universidade Estadual do Ceará em 1983. Especialista em Automação pela Universidade de Campinas. Em 1995, recebeu o título de Ph.D. pela Loughborough University of Technology – Inglaterra. Desde 1981 trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. A área de interesse é Qualidade de Energia.

Ivo Carvalho de Albuquerque, nascido em Fortaleza/CE em 12/06/1976. Formado pela Universidade Federal do Ceará – UFC em 2000, atualmente cursando Pós-Graduação. Publicações em encontros locais no COBENGE, SNPTEE e INDUSCON. Área de atuação concentrada em Qualidade de Energia.