



V SBQEE
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
17 a 20 de Agosto de 2003
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 107
Tópico: Modelagens e Simulações

SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS NO AMBIENTE SIMULINK UTILIZANDO O PROGRAMA POWER SYSTEM BLOCKSET

Ricardo J. O. Carvalho*

Elisete T. Pereira

Juliano Bachmann**

Universidade Regional de Blumenau – FURB

**Companhia de Eletricidade de Santa Catarina - CELESC

RESUMO

O trabalho investiga os transitórios decorrentes de chaveamento de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia. Além da resposta natural do circuito são analisados os transitórios de alta frequência que se sobrepõem aos sinais de tensão e corrente. As simulações foram realizadas no ambiente do Simulink, fazendo uso das facilidades do Power System Blockset. Complementando o trabalho, apresenta-se um estudo de caso, em um sistema real, tomando como base os registros dos transitórios da corrente de energização de um banco de capacitores.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação de Transitórios, Ondas Viajantes, Chaveamento de Banco de Capacitores.

1.0 - INTRODUÇÃO

As subestações dos sistemas de distribuição assim como dos consumidores em geral estão inseridas em um ambiente eletromagnético bastante hostil tendo em vista os fenômenos eletromagnéticos, comuns aos sistemas de potência. Uma parte destes transitórios decorre de manobras em equipamentos do sistema elétrico de potência. A avaliação da magnitude, duração e frequência desses distúrbios é de interesse tendo em vista as possíveis interferências em equipamentos sensíveis da instalação.

A análise de transitórios em sistemas elétricos tem sido tradicionalmente realizada com auxílio do programa de análise transitória ATP/EMTP. O programa de análise transitória ATP é uma poderosa ferramenta computacional que oferece facilidades de modelagem de equipamentos de sistemas elétricos, incluindo-se os de eletrônica de potência. O ATP é provavelmente o programa de análise de transitórios em sistemas de potência mais utilizado no mundo. Entretanto, vários outros programas de simulação de transitórios vêm demonstrando interessantes resultados e facilidades.

O artigo apresenta alguns dos recursos do software Power System Blockset (PSBs) para simulação de fenômenos transitórios em sistemas elétricos. A resposta do sistema elétrico ao chaveamento de um banco de capacitores é analisada quanto a sua componente na frequência natural do circuito e da componente de alta frequência. em sistemas de distribuição de energia. sistemas de energia. Apresenta-se um estudo de caso referente ao chaveamento de banco de capacitores em um sistema de distribuição real com nível de tensão de 23.8kV.

2.0 - TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Uma classe de fenômenos transitórios aos quais os sistemas elétricos estão sujeitos, são aqueles decorrentes de chaveamentos nos componentes do sistema. Estes transitórios fazem parte dos denominados problemas de qualidade de energia

também caracterizados como problemas de Compatibilidade Eletromagnética [1].

Nos sistemas de distribuição esses distúrbios passam na maioria das vezes despercebidos. Seus efeitos são sentidos em alguns casos através do efeito visual nas lâmpadas ou outros equipamentos sensíveis, são popularmente referenciados como “piscas” do sistema. De fato, estes transitórios são fortemente amortecidos pela rede de distribuição e sua duração não ultrapassa, em geral, alguns milissegundos.

O uso de equipamentos eletrônicos e de automação está cada vez mais incorporado aos novos conceitos de subestação. Exemplos dessas mudanças são as substituições dos relés eletromecânicos convencionais por relés digitais, comando via contactores por controladores programáveis, etc. Esses dispositivos além de serem sensíveis às variações na forma de onda da tensão de alimentação são susceptíveis as variações intensas de campo elétrico e magnético na vizinhança [1].

Nos sistemas de distribuição, uma componente do transitório de chaveamento se propaga de forma similar ao fenômeno de ondas viajantes em linhas de transmissão. A outra componente transitória se desenvolve na frequência natural do circuito.

Numa linha de transmissão a relação entre ondas viajantes de tensão e corrente são estabelecidas pelas equações gerais de ondas em linhas de transmissão, conhecidas como equações da telegrafia [2]. Considerando uma linha ideal, estas equações são escritas como

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (2)$$

onde L e C são a indutância e a capacitância da linha por unidade de comprimento.

A solução das equações (1) e (2), mostrada por D'Alembert, é expressa em termos de ondas que viajam pela linha de transmissão tanto no sentido positivo, do transmissor ao receptor, como negativo, isto é, do receptor ao transmissor. As equações de tensão e corrente, descritas em função da distancia e do tempo, são expressões do tipo:

$$V(x,t) = \frac{1}{2} [f_1(vt-x) + f_2(vt+x)] \quad (3)$$

$$I(x,t) = \frac{1}{2Z_0} [f_1(vt-x) - f_2(vt+x)] \quad (4)$$

onde

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

É a velocidade de propagação em km/s, e

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (6)$$

é a impedância de surto (ou característica) da linha, em ohms.

As equações (3) e (4) representam ondas de tensão e corrente que se propagam pela rede de distribuição. A figura-1 a seguir ilustra ondas viajantes de corrente decorrentes do chaveamento de um banco de capacitor.

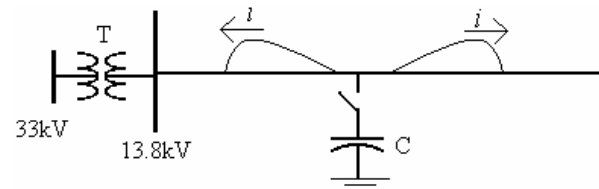


Figura-1: Ondas viajantes de corrente

A cada descontinuidade encontrada parte da onda é refletida e outra parte é transmitida, dependendo da impedância característica de cada trecho de rede. O diagrama de Lattice mostrado na figura-2 descreve as reflexões de uma onda de corrente injetada nem Z_c .

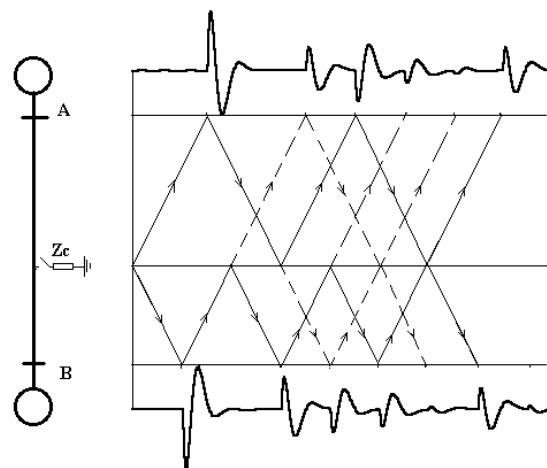


Figura-2: Diagrama de Lattice

Estes sinais transitórios de alta frequência estão sobrepostos a corrente de energização do capacitor. A magnitude e frequência da corrente de energização do capacitor podem ser determinadas a partir da resposta a um degrau de magnitude $\sqrt{2}E$ conforme o circuito da figura-3.

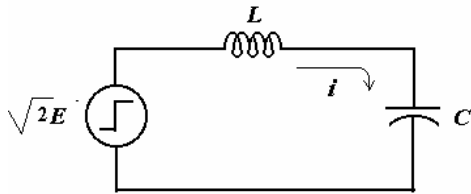


Figura-3: Circuito LC

onde L é a indutância do sistema e C é capacitância do banco do capacitor. A corrente no domínio da frequência é dada por

$$I(s) = \frac{\sqrt{2}EC}{1+s^2LC} \quad (7)$$

a equação (7) pode ser reescrita como

$$I(s) = \frac{\sqrt{2}E}{L} * \frac{1}{\frac{1}{LC} + s^2} \quad (8)$$

a frequência natural da corrente transitória é definida como

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

A frequência natural do transitório pode ser estimada com base no valor da corrente de curto-circuito (I_{cc}), no ponto de instalação do banco de capacitores, e da corrente nominal do banco (I_n). Considerando que

$$|I_{cc}| \approx \frac{1}{\omega L} \quad e \quad |I_n| \approx EC \quad (10)$$

onde ω é a frequência industrial. Substituindo-se L e C , obtidos em (10), na equação (9) obtém-se

$$f_n = f_0 \sqrt{\frac{I_{cc}}{I_n}} \quad (11)$$

onde f_0 é igual a 60 Hz.

3.0 - SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS USANDO O PSBS - SIMULINK

O Power System Blockset (PSBs) é um pacote computacional incorporado ao ambiente Simulink do Matlab [3]. Este pacote oferece uma biblioteca para elementos de sistemas de potência bastante atual e completa. A biblioteca oferece uma grande variedade de máquinas elétricas, linhas de transmissão, vários tipos de transformadores, cargas variadas, disjuntores, chaves e etc. A biblioteca também dispõe de elementos de eletrônica de potência possibilitando a simulação de dispositivos FACTs entre outros.

Como o PSBs está integrado ao ambiente do Simulink, é possível fazer uso de facilidade de outras bibliotecas como a de controle, de processamento de sinais, estatística, etc. Esta

facilidade torna o PSBs uma ferramenta poderosa na simulação de sistemas elétricos, incluindo-se a simulação de fenômenos transitórios.

A figura-4 mostra uma montagem desenvolvida no ambiente do Simulink, usando recursos do PSBs, para simulação dos efeitos da energização de um banco de capacitores. Medidores de corrente e tensão foram instalados no barramento da subestação, no ponto de conexão do banco e num ponto remoto localizado ao longo do alimentador. Esta montagem está associada ao estudo de caso descrito no próximo item. A figura-5 mostra a forma de onda das correntes registradas após a energização do banco.

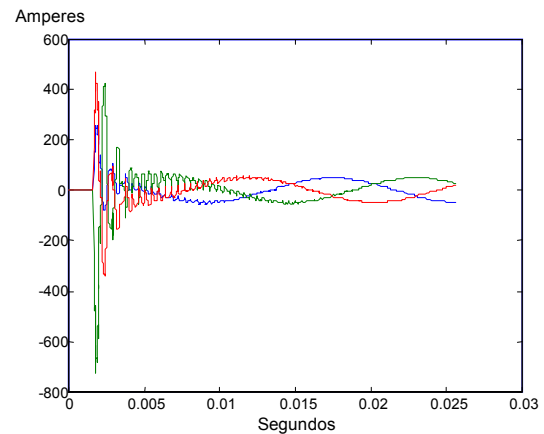


Figura 5: Corrente de energização do capacitor

Da figura verifica-se que os transitórios praticamente desaparecem decorridos aproximadamente 20 milissegundos.

A componente de alta frequência da corrente foi separada da componente na frequência natural do circuito através de processo de filtragem digital. A figura-7 ilustra as respectivas formas de onda.

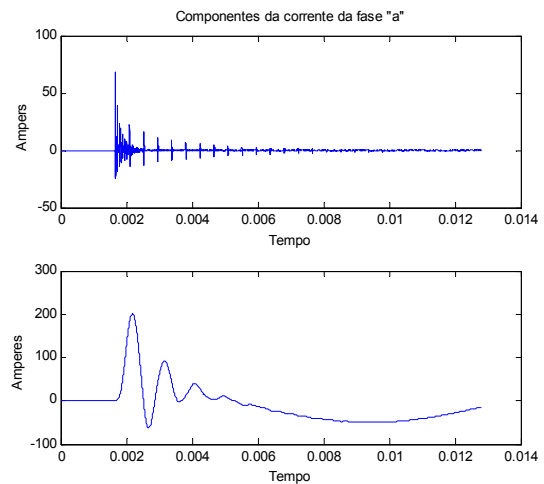


Figura-7 Componentes da corrente

A corrente de curto circuito, medida no ponto de conexão do banco é de 4.86KA, enquanto a corrente nominal do Banco é de 29,1A. Portanto, a frequência natural do circuito é de 775,3Hz.

4.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido num alimentador aéreo de distribuição em 23,8kV, da Celesc.- Companhia de Eletricidade do Estado de Santa Catarina. O referido alimentador vem sendo monitorado através de dois equipamentos que incorporam a função de aquisição de dados. Os equipamentos estão indicados como Ponto de Medição 1 e 2, no diagrama unifilar da figura-10.

Os equipamentos registraram os transitórios de corrente referente ao chaveamento de um banco de capacitores de 3.2kVAr, instalados no barramento da subestação (Ponto de Medição 1). O mesmo transiente foi registrado pelo segundo equipamento (Ponto de Medição 2). Os aparelhos registram os distúrbios transitórios de alta frequência com uma taxa de amostragem de 8 nanosegundos. Os mesmos dispõem de placa de GPS (Global Position System) para sincronização do tempo de aquisição dos dados.

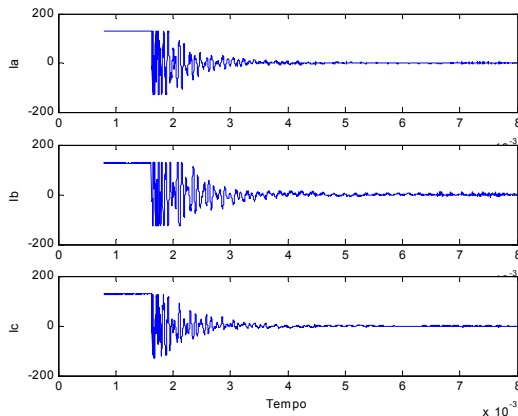


Figura-8: Registro das correntes no 1º. ponto de medição

A figura a seguir apresenta os registros reais, obtidos em campo, a partir do ponto de medição 1.

O corte no valor máximo dos registros decore do ajuste no limite de ganho no estágio de entrada analógica dos dados. Os sinais de baixa frequência foram filtrados através de filtro analógico, no estágio analógico, e posteriormente tratados através de processamento digital dos sinais.

A figura-9 mostra os registros dos mesmos transitórios no segundo equipamento, após um intervalo de tempo de 56,2 microsegundos. A distancia entre os pontos de medição é de 15,2 Km.

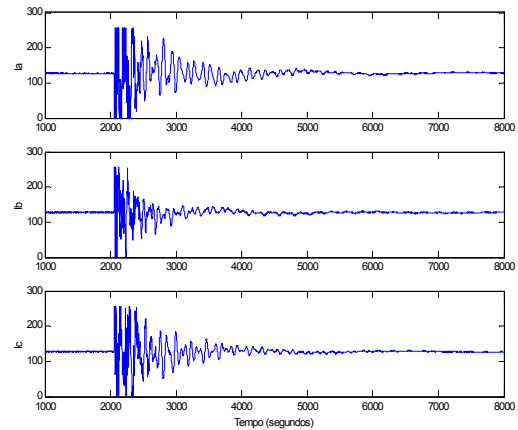


Figura-9: Registro das correntes no 2º. ponto de medição

Os sinais estão cortados, nos instantes iniciais devido ao ajuste do ganho na placa de aquisição de dados, da mesma forma como ocorreu com o os registros do primeiro equipamento.

Os registros comprovam a viabilidade da aquisição de fenômenos transitórios de alta frequência em sistemas de distribuição.

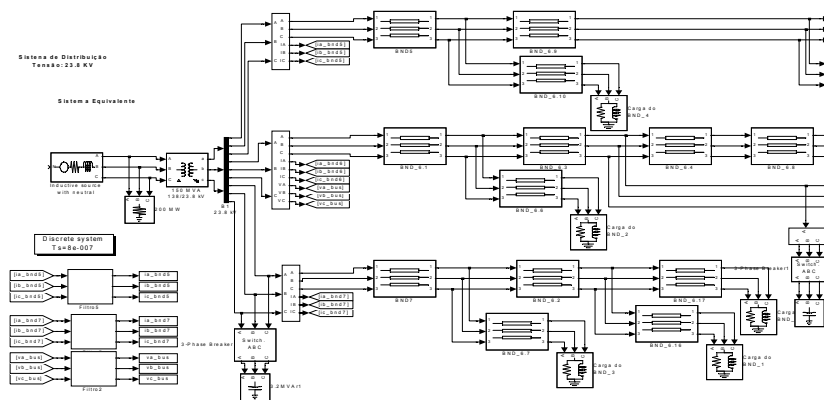


Figura-4: Montagem do sistema no Simulink

5.0 - CONCLUSÕES

O artigo demonstrou a potencialidade do pacote computacional PSBs do Simulink/Matlab na simulação de fenômenos transitórios em sistemas de distribuição.

Analisou-se o problema do chaveamento de banco de capacitores em sistemas de distribuição, identificando as componentes de alta frequência associada ao transitório da corrente. Registros reais, obtidos em campo, mostram a componente de alta frequência adquiridos em pontos remotos de um alimentador em 23.8kV.

O trabalho mostra que a modelagem do sistema para avaliação dos transitórios decorrentes de chaveamento de capacitores deve incorporar os

efeitos das ondas viajantes de tensão e corrente injetada no ponto de ligação do banco.

Uma modelagem baseada no método TLM (Transmission Line Modeling) está sendo desenvolvida, porém isto será assunto de outro provável artigo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIGRE WORKING GROUP 36.04: Guide on EMC in Power Plants and Substation, April 1997.
- [2] Allan Greenwood, Electrical Transient in Power System. Jhon Wiley, 1991.
- [3] Matlab – Power System Blockset User's Guide – For use with Simulink, (1998). TEQSIM International, Hidro-Québec, Math Works.

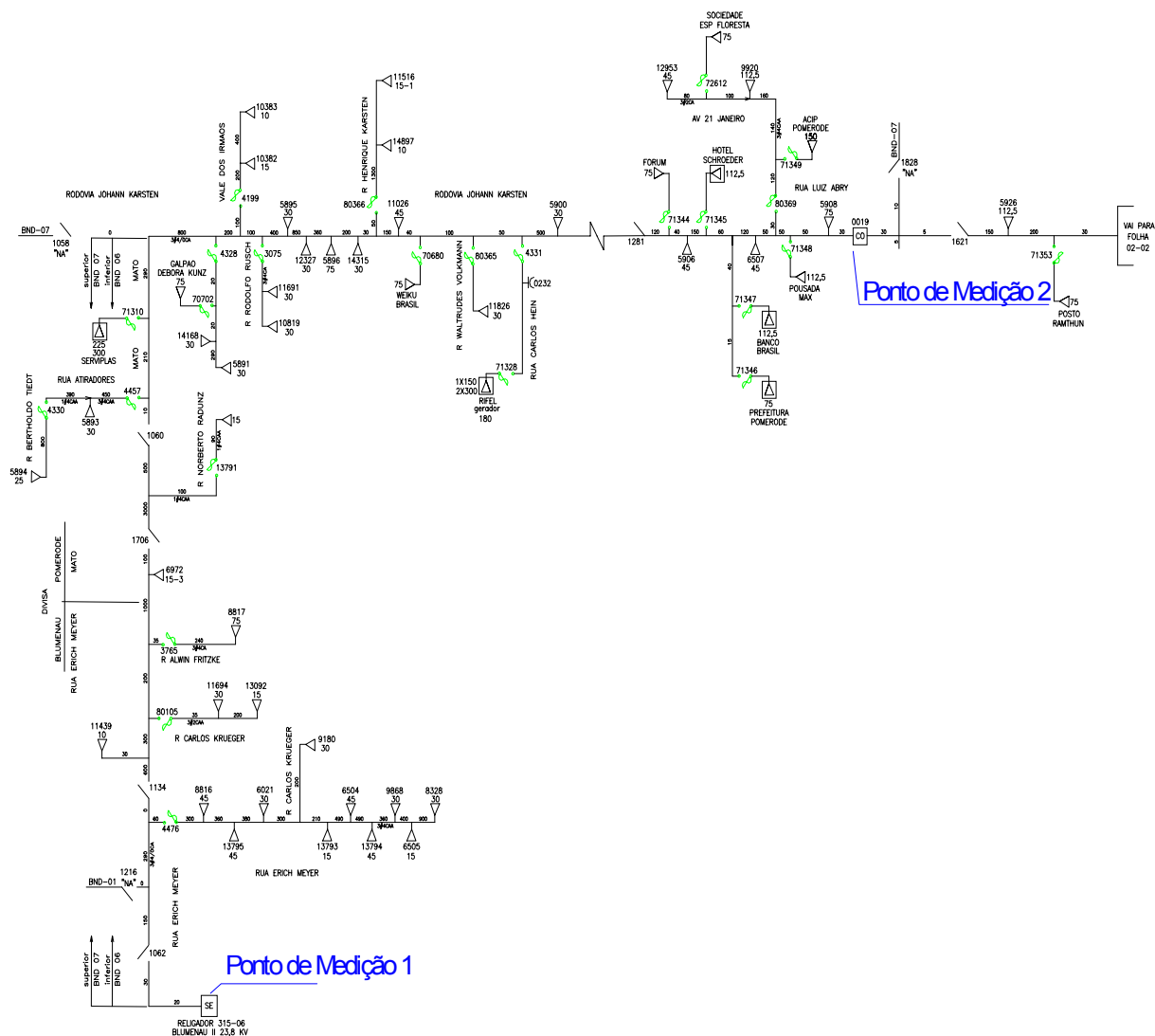


Figura 10: Diagrama Unifilar do Sistema em Estudo