



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

GCQ-10
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA – GCQ**

SIMULAÇÃO DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

**Marcos André da Frota Mattos*
OKIME Eletromagnetismo Aplicado**

RESUMO

Neste trabalho é mostrado o desenvolvimento de um simulador numérico para analisar sistemas de potência no domínio do tempo para fins de componentes harmônicas. Os efeitos podem ser analisados levando em conta as características dos dispositivos não lineares em lugar das representações por meio de fontes de corrente concentradas de componentes harmônicas. Estas fontes de correntes mascaram vários efeitos mas ainda assim se necessário podem ser incluídas no modelo do sistema elétrico. A análise de três casos onde são mostrados a flexibilidade, a avaliação dos erros inerentes e a qualidade dos resultados alcançados. A técnica numérica adotada é o TLM (*Transmission Line Matrix*)

PALAVRAS-CHAVE

harmônicas, distribuição, carga não-linear, sobretensão, filtro, ressonância, TLM, simulação numérica

1.0 - INTRODUÇÃO

Usualmente o sistema de potência tem sido encarado como sendo um sistema de tensão e corrente alternada senoidal [1 à 7], isto na prática não ocorre em decorrência das diversas cargas que provocam a distorção das ondas de tensão e de corrente. Desta forma, a análise harmônica é um importante item no projeto e operação de sistemas de potência. Esta análise proporciona a identificação de pontos de ressonância, avaliação das perdas e a melhora da qualidade de energia entregue ao consumidor. Alguns

equipamentos sofrem de envelhecimento acelerado na presença de harmônicas

Esta distorção da onda pode ser analisada supondo a onda do sistema periódica e então utilizar a decomposição das ondas de tensão e de corrente em componentes harmônicas. Este processo leva a uma aproximação, o que deixa de fora da análise frequências harmônicas não características. Para uma análise mais completa e precisa é necessário incluir todos os tipos de componentes provocadas pelas cargas, e para isto, a análise deve ser feita no domínio do tempo. No domínio do tempo também é possível incluir o efeito da oscilação de tensão no ponto em que esta está sendo provocada, isto é, não há a necessidade de modelar a carga como uma fonte de corrente harmônica. Este processo de análise no tempo é desenvolvida neste trabalho utilizando a técnica numérica TLM (*Transmission Line Matrix*). Esta técnica permite o cálculo direto dos valores de tensão e corrente, evitando assim o inconveniente de aproximações sucessivas que pode levar a uma instabilidade do sistema numérico. Esta técnica tem sido usada em simulação de diversos sistemas elétricos e eletromagnéticos. Uma outra vantagem é que os erros de modelamento são vistos como capacitores e indutores parasitas, que muitas vezes fazem parte do sistema real. As linhas de transmissão, as linhas de distribuição, as cargas lineares e não lineares, transformadores etc. são modelados no domínio do tempo. O resultado final da simulação é obtida no domínio do tempo e o espectro de frequências é calculado a partir da transformada de Fourier discreta. Alguns casos de sistemas de distribuição e de transmissão são analisados quando da presença de cargas especiais. A influência de bancos de capacitores nas componentes harmônicas é

* Rua Vicente Stancato, 590 - CEP 13085-121 - Campinas - SP - BRASIL
Tel.: (19) 3287-6883 - E-MAIL: marcos@okime.com.br

explorada. Também é mostrado um caso de sobretensão harmônica em um sistema de distribuição. O sistema desenvolvido proporciona o estudo de componentes harmônicas e do fluxo de carga tanto na frequência industrial como no domínio do tempo.

2.0 - MODELO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

2.1 Linhas de Transmissão

O modelo TLM de linhas de transmissão considera uma resistência (R), uma capacitância (C) e uma indutância (L), como mostrado na figura 1. As equações para calcular $i(t)$ e $v(t)$ a cada nó da linha são obtidas das tensões incidentes V_1 e V_3 em cada

$$\text{nó}[1,3]: V(t) = V_1 + V_3 \quad \text{e} \quad i(t) = \frac{2V_1 \square V(t)}{R + Z}$$

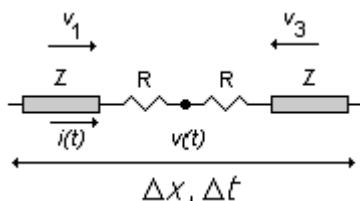


FIGURA 1 – Modelo TLM da linha de transmissão; Z -

impedância, $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$, e R - resistência.

O segmento da linha é obtido por: $\frac{\square x}{\square t} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

2.2 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores estão representados por um capacitor derivação de acordo com a equação, figura 2:

$$Z_C = \frac{\square t}{2C}, \text{ onde } C \text{ é a capacitância para a terra do}$$

banco e Z_C é a impedância característica do modelo TLM [8]. A linha de transmissão que representa o banco de capacitores está aberta na sua terminação.

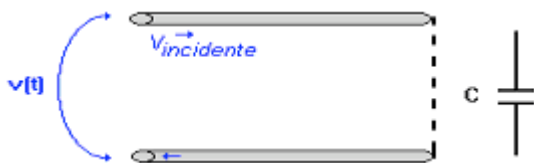


FIGURA 2 – Modelo TLM de um banco de capacitores.

2.3 Indutor Derivação

Os indutores estão representados por um indutor derivação de acordo com a equação:

$$Z_L = \frac{2L}{\square t}, \text{ onde } L \text{ é a indutância para a terra do}$$

banco e Z_L é a impedância característica do modelo TLM [8]. A linha de transmissão que representa o indutor está curto-circuitada na sua terminação.

2.4 Tiristores e Retificadores

Os tiristores estão representados por resistores de valores insignificantes quando conduzindo e por resistores com valores elevados quando em aberto [8]. Estes valores dos resistores são escolhidos de forma a não afetarem os resultados.

Os retificadores são tiristores simples ou montados em antiparalelo.

2.5 Fontes

As fontes são geradores de tensão ideais em série um resistor e um indutor. Isto permite uma representação de um gerador real mais próximo da realidade.

3.0 - MODELO TLM

O sistema elétrico é representado por nós onde os diversos dispositivos e componentes estão ligados, ver figura 3. Estes componentes estão modelados de acordo com os modelos TLM individuais descritos anteriormente. Um processo iterativo de tensões incidentes e refletidas proporciona a propagação dos sinais pelo sistema modelado. A saída dos resultados é no domínio do tempo mas com a utilização da transformada de Fourier o espectro de frequência é obtido para o sinal desejado, em tensão ou corrente.

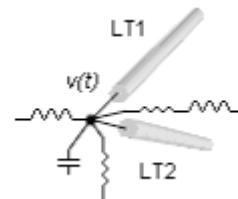


FIGURA 3 – Nó do sistema elétrico com linhas de transmissão, resistores, capacitor e indutor.

4.0 - RESULTADOS

Os resultados estão divididos em três casos descritos a seguir. Em todos os casos os parâmetros de linha de distribuição são os mesmos.

4.1 Caso 1: Carga não linear

Neste caso foi considerado uma fonte senoidal alimentando uma carga tiristorizada de 100kVA e chaveada em 60° . Isto é, dois tiristores em antiparalelo em série com uma carga resistiva. Uma linha de transmissão de 8km liga a fonte a carga, a fonte é 13,8kV trifásica, e a linha tem os parâmetros $L=1,769 \square \text{H/m}$, $C=6,47 \text{pF/m}$ e $R=0,493 \text{m} \square / \text{m}$, ver figura 4. O resultado da simulação pode ser visto na figura 5 onde aparece a forma de onda de corrente na carga e o espectro de frequência associado.



FIGURA 4 – Carga resistiva sendo alimentada por uma fonte senoidal, 60Hz, 13,8kV trifásico e linha de transmissão com 8km.

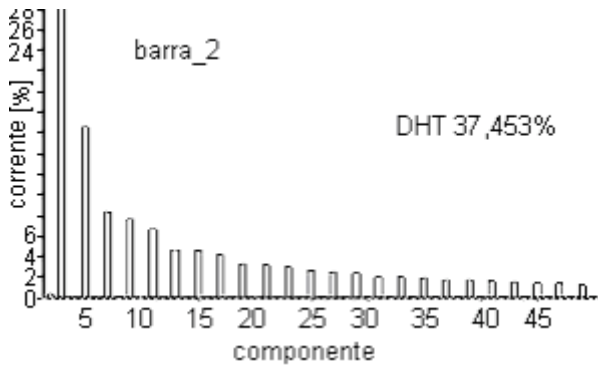
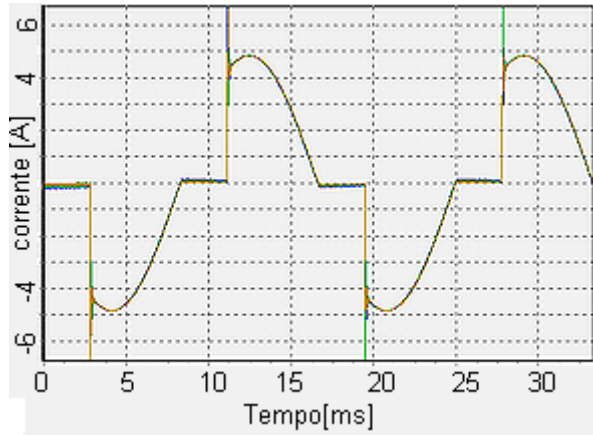


FIGURA 5 – Corrente no tempo na carga tiristorizada e espectro harmônico correspondente.

4.2 Caso 2: Influência do Banco de Capacitores

No circuito do caso anterior foi acrescido um banco de capacitores de 100kVAR, ver figura 6. O resultado do espectro harmônico de corrente no início da linha pode ser visto na figura 7. Nota-se claramente uma ressonância na 27ª harmônica.

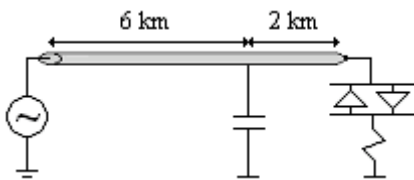


FIGURA 6 – Inclusão de banco de capacitores a 2km da carga.

A simulação foi repetida com um banco de capacitores de 300kVAR. Neste caso, como era esperado, a ressonância ocorreu em uma harmônica de ordem mais baixa, a 15ª harmônica. As figura 7 e 8 mostram o espectro de frequências no barramento da fonte,

indicando assim a penetração das harmônicas provocadas pela carga não linear a 8km de distância.

Por estas simulações fica claro que a presença do banco de capacitores proporciona uma ressonância em uma determinada componente harmônica, e quanto maior for o banco de capacitores mais baixa será a frequência de ressonância.

O banco de capacitores também atuou como um filtro pois a distorção harmônica total reduziu de 37% para 7%, indicando que o banco estaria sofrendo aquecimento, e envelhecimento acelerado, devido às harmônicas de corrente passando por este.

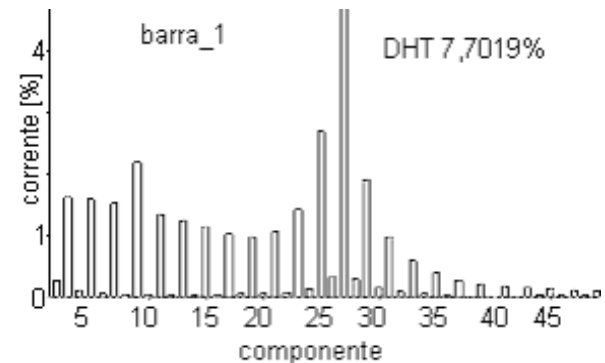


Figura 7: Espectro de frequências no barramento da fonte. Linha com banco de capacitores de 100kVAR a 6km da fonte e a 2km da carga tiristorizada.

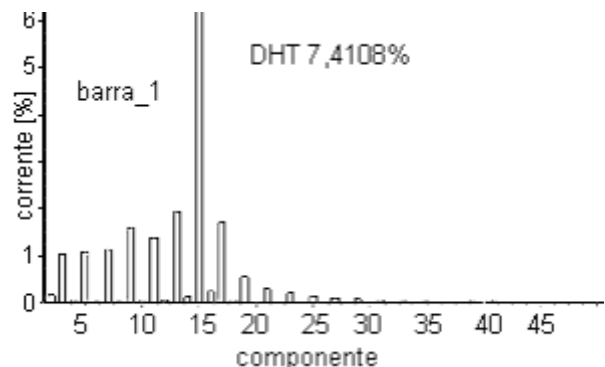


FIGURA 8 – Espectro de frequências no barramento da fonte. Linha com banco de capacitores de 300kVAR a 6km da fonte e a 2km da carga tiristorizada.

4.3 Caso 3: Ressonância em Tensão

Neste caso é simulado um circuito com penetração de harmônicas com sobretensão ocasionada por ressonância. A figura 9 mostra o diagrama unifilar utilizado com os respectivos valores dos componentes do circuito. Na barra_2 foi colocado um conjunto de dois tiristores em anti-paralelo disparando em 80° em série com uma carga resistiva de 100kW, na barra_4 foi inserido um resistor linear de 50kW. É interessante notar o surgimento de uma sobretensão na 12ª harmônica de mais de 6% na barra_4. Deve-se dizer que este resultado não foi alterado quando variando-se o intervalo de tempo em até 20 vezes. A distorção harmônica total (DHT) de tensão sem o banco de capacitores na barra_3 é de 0,025%.

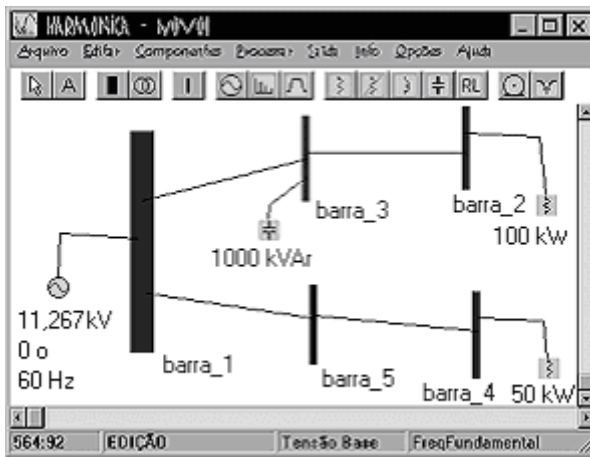


FIGURA 9 – Diagrama unifilar. Linhas 1-3, 1-5 e 5-4 de 2km, linha 3-2 de 4km, mesmos parâmetros elétricos dos casos anteriores.

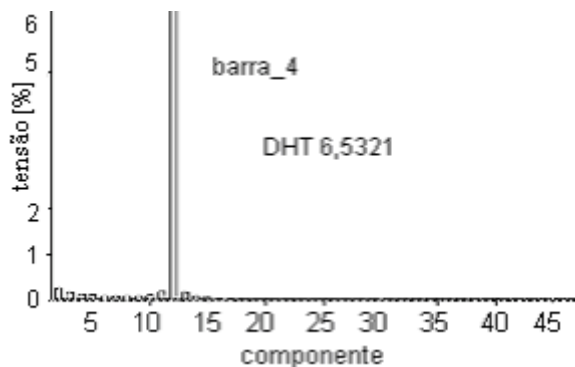


FIGURA 10 – Espectro de freqüências de tensão na barra 4.

5.0 - CONCLUSÃO

O modelo do sistema elétrico no domínio do tempo com o uso da técnica numérica TLM mostrou resultados com um grau de precisão superior aos modelos usuais no domínio da freqüência. A variação do intervalo de tempo utilizado não levou a alteração dos resultados de tensão e corrente, proporcionando uma consistência numérica do modelo.

Simulações de sistemas de potência mostraram a propagação de harmônicas no sistema, a influência de capacitores nas componentes harmônicas e efeitos de ressonância. O tempo de computação é bastante reduzido justificando o uso em sistemas reais para efeito de localização de fontes harmônicas, alocação de banco de capacitores, instalação de filtros, avaliação prévia dos efeitos de cargas especiais a serem instaladas bem o conhecimento de perdas e quedas de tensão no sistema de potência.

Os efeitos combinados de diversas cargas não lineares pode ser analisado levando em conta a interferência mútua das diversas não linearidades. Este processo permite a análise de componentes harmônicas não característicos do sistema elétrico. Os efeitos de cintilação e de inter-harmônicas também podem ser analisados por este processo interativo. A inclusão de filtros de harmônicas múltiplas de três proporcionariam

a simulação de transformadores delta-estrela, o erro TLM neste modelo representaria a capacitância parasita do transformador [3].

6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Network: Part I: concepts, models and simulation techniques", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 11, No 1, January 1996.
- (2) IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Network: Part II: samples systems and examples", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 11, No 1, January 1996.
- (3) A Medina and J.Arrillaga; "Generalised Modelling of Power Transformers in the Harmonic Domain", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 7, No 3, July 1992.
- (4) A Mansoor and al; "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads", IEEE Trans Power Delivery, Vol. 10, No. 1, Jan 1995.
- (5) W.Mombauer; "Load Modelling for Harmonic Flow Calculations", ETEP Vol. 3, No. Nov/Dec 1993.
- (6) McGranaghan, R.C.Dugan and W.L.Sonsler; "Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics", IEEE PES Summer Meeting, 1980.
- (7) McGranaghan, R.C.Dugan, J.A King and W.T.Jewell; "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans Power App. Syst, Vol PAS-103, No. 12, Dec 1984.
- (8) C.Christopoulos; "The Transmission-Line Modeling Method TLM", IEEE press, 1995.