

# ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS NÃO-LINEARES : O CASO DO CONVERSOR CA/CC DE 6 PULSOS

Walmeran José Trindade Júnior

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba – CEFET-PB

e-mail : walmeran@zaitek.com.br

## Resumo

*Neste trabalho é mostrada uma nova metodologia para a análise de circuitos elétricos não-lineares, com aplicação na obtenção da resposta do conversor CA/CC de 6 pulsos. Essa nova metodologia, baseada no método de Newton, é geral no domínio do tempo e pode determinar a resposta desses circuitos tanto em regime transitório como em regime permanente.*

Palavras-Chave : Circuitos não-lineares. Conversor CA/CC de 6 pulsos.

## 1. Introdução

O processo de automação industrial tem feito aumentar o uso de várias fontes de distorções harmônicas, tais como : retificadores, inversores, controladores de velocidade de motores e muitos outros tipos de conversores estáticos. Por outro lado, novos equipamentos elétricos mais sofisticados e mais sensíveis às distorções nas formas-de-onda de tensão e/ou corrente estão sendo projetados e instalados. Na área residencial, é crescente o número de cargas não-lineares como televisores, fornos de microondas, computadores e outros aparelhos eletrônicos. Sistemas de iluminação pública, que utilizam lâmpadas de descarga, formam outra área onde o impacto do fenômeno da distorção harmônica está se tornando importante para os sistemas de distribuição de energia elétrica.

O conversor CA/CC de 6 pulsos é uma das principais fontes de harmônicos em sistemas de potência, pois a corrente drenada por ele tem uma forma-de-onda quase quadrada. Ele é a forma mais comum de conversor estático de potência, encontrado numa ampla faixa de potência e muito usado em terminais HVDC (links CC), acionadores de máquinas CC e em controladores de velocidade ajustável. Além de ser encontrado em praticamente todos os sistemas elétricos residenciais, comerciais e industriais.

A análise da resposta do conversor CA/CC é de natureza não-linear, e entre os vários métodos desenvolvidos para essa análise podemos citar o Clássico [1], o de Newton [2] e o da Variável de Estado [3]. S. R. Naidu e W. J. Trindade [4] apresentaram uma nova metodologia para simular a resposta de circuitos não-lineares, com ênfase nos conversores CA/CC de 6 pulsos. Essa metodologia aplica convenientemente fontes de tensão fictícias no circuito, de modo a separá-lo em uma parte linear e outra não-linear. A análise do circuito é simplificada e as correntes residuais através das fontes de tensão fictícias são determinadas. O propósito da nova técnica é determinar as fontes de tensão fictícias tal que as correntes residuais sejam nulas. A técnica é geral e pode ser aplicada na determinação dos regimes transitório e permanente desses circuitos.

## 2. A Nova Técnica para a Análise de Circuitos Não-lineares:

A Figura 1 apresenta um circuito elétrico não-linear. Para a solução desse circuito utilizando a metodologia adotada por programas computacionais do tipo EMTP, o indutor e o capacitor são inicialmente substituídos por seus equivalentes de Norton, consistindo em resistências em paralelo com fontes de corrente fictícias (Figura 2).

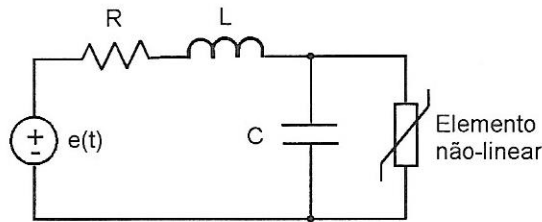


Figura 1 : Circuito não-linear.

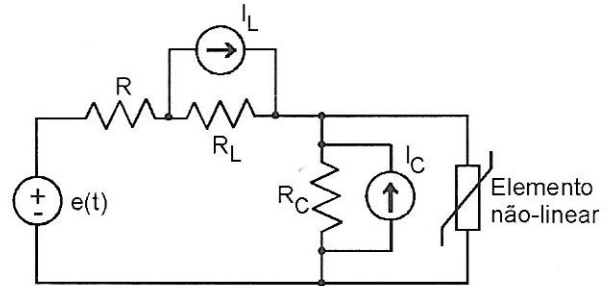


Figura 2 : Modelo EMTP.

A parte linear do circuito é então reduzida ao seu equivalente de Thevenin (Figura 3), ou seja, uma fonte de tensão  $e_0$  em série com uma resistência  $R_{TH}$ . A tensão  $v_D$  nos terminais do elemento não-linear é a solução das equações

$$F = v_D + R_{TH}i_D - e_0 = 0 \quad (1)$$

$$i_D = f(v_D) \quad (2)$$

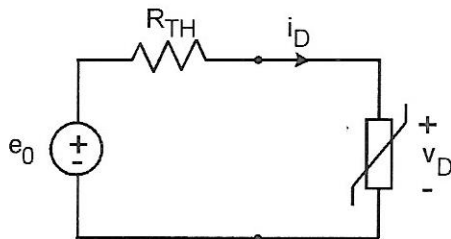


Figura 3: Equivalente de Thevenin.

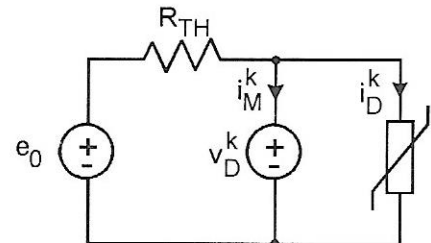


Figura 4: Conexão da fonte de tensão fictícia.

Essa solução pode ser aproximada iterativamente pelo procedimento de Newton-Raphson :

$$\Delta v_D^k = -F / \left( \frac{\partial F}{\partial v_D} \right)^k \quad (3)$$

$$v_D^{k+1} = v_D^k + \Delta v_D^k \quad (4)$$

onde  $k$  é o número da iteração e  $\Delta v_D^k$  é a correção a ser adicionada para aproximar a solução  $v_D^k$ . Um procedimento alternativo resulta se a correção  $\Delta v_D^k$  é escrita como :

$$\begin{aligned}\Delta v_D^k &= -\frac{v_D^k + R_{TH} i_D^k - e_0}{1 + R_{TH} \left( \frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right)^k} \\ &= \frac{R_{TH} R_D^k}{R_{TH} + R_D^k} \cdot i_M^k\end{aligned}\quad (5)$$

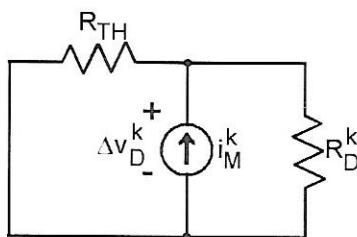
onde

$$i_M^k = \frac{e_0 - v_D^k}{R_{TH}} - i_D^k \quad (6)$$

e  $R_D^k = \left( \frac{\partial v_D}{\partial i_D} \right)^k$  é o equivalente linearizado ou para pequeno sinal do elemento não-linear.

Se uma fonte de tensão  $v_D^k$  é conectada aos terminais do elemento não-linear, como mostra a Figura 4, a corrente que circulará por esta fonte fictícia será a corrente residual  $i_M^k$ . A conexão da fonte de tensão  $v_D^k$  em paralelo com o elemento não-linear separa o circuito em uma parte linear e outra não-linear, facilitando a determinação da corrente residual  $i_M^k$ .

Se a fonte de tensão  $v_D^k$  é substituída por uma fonte de corrente residual  $i_M^k$  com polaridade oposta, como mostra a Figura 5, se o elemento não-linear é substituído pelo seu equivalente linearizado (também chamado equivalente para pequeno sinal) e se a fonte de tensão  $e_0$  é removida (curto-circuitada), a tensão vista entre os terminais da fonte de corrente residual será a correção a ser adicionada para aproximar a solução  $v_D^k$ . A computação pode agora prosseguir para a próxima iteração, com o objetivo de se determinar o valor da fonte de tensão  $v_D^k$  de tal modo que a corrente residual  $i_M^k$  seja nula ou menor que uma



dada tolerância.

**Figura 5 : Determinação de  $\Delta v_D^k$ .**

O cálculo do transitório se processa, portanto, aplicando-se o procedimento descrito acima ponto a ponto, com um passo de tempo apropriado e condições iniciais conhecidas. O regime permanente pode ser alcançado repetindo-se o cálculo do transitório tantos ciclos quantas forem necessários para esse fim.

### 3. Análise do Conversor CA/CC de 6 pulsos :

A Figura 6 mostra um típico conversor CA/CC de 6 pulsos com as fontes de tensão fictícias  $e_{AB}$ ,  $e_{BC}$  e  $e_{LD}$  conectadas de acordo com a técnica proposta. Embora existam seis

elementos não-lineares neste circuito, as três fontes fictícias são suficientes para separar o conversor em duas partes lineares, compreendendo os sistemas CA e CC, e uma parte não-linear correspondendo às seis válvulas.

Sem perda de generalidade, o sistema CA é representado pela conexão delta das fontes do sistema trifásico. O sistema CC consiste em um reator de alisamento (filtro), em série com uma resistência e com uma fonte CC. O conversor é uma ponte de 6 pulsos e as válvulas são individualmente engatilhadas. Durante cada período da frequência fundamental, cada válvula permanece bloqueada desde o seu ponto natural de engatilhamento até o seu instante de disparo. No restante do período, a válvula assume um comportamento como um diodo não-ideal.

A análise das partes lineares dá as correntes  $i_{LA}$ ,  $i_{LB}$  e  $i_{LD}$ . As correntes  $i_{NA}$ ,  $i_{NB}$  e  $i_{ND}$  são provenientes da análise da parte não-linear, bem como os equivalentes dinâmicos das válvulas. Assim, os resíduos de corrente nas fontes fictícias de tensão são :

$$\delta i_{AB} = i_{LA} - i_{NA} \tag{7}$$

$$\delta i_{BC} = i_{LB} - i_{NB} + \delta i_{AB} \tag{8}$$

$$\delta i_{LD} = i_{ND} - i_{LD} \tag{9}$$

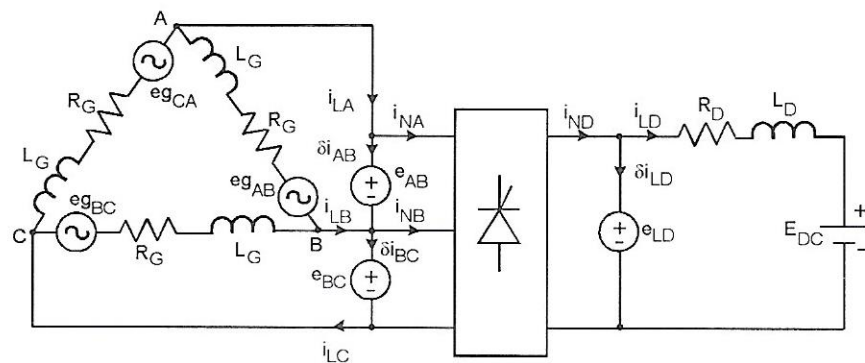


Figura 6 : Conversor CA/CC de 6 pulsos.

A parte não-linear tem as fontes de tensão fictícias  $e_{AB}$ ,  $e_{BC}$  conectadas no lado CA e a fonte  $e_{LD}$  no lado CC, como mostra a Figura 7. As correntes  $i_{NA}$ ,  $i_{NB}$  e  $i_{ND}$  são determinadas através da aplicação recursiva da técnica proposta. Uma fonte de tensão fictícia  $e_{ND}$  é conectada aos terminais de uma das válvulas. As tensões e correntes de todas as válvulas podem agora ser calculadas e o resíduo de corrente  $i_{MD}$  é determinado.

Com esses valores de tensão nas válvulas, calculam-se as suas correntes e condutâncias através da curva característica  $i = f(v)$  e  $G_D = \frac{\partial i}{\partial v}$ .

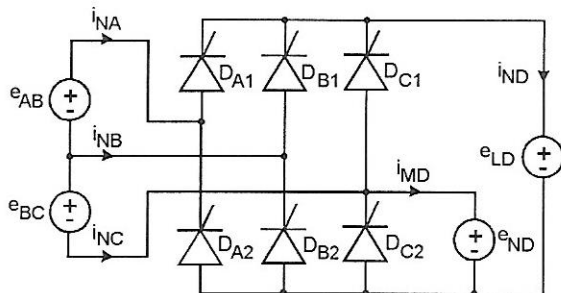


Figura 7 : Circuito equivalente da parte não-linear.

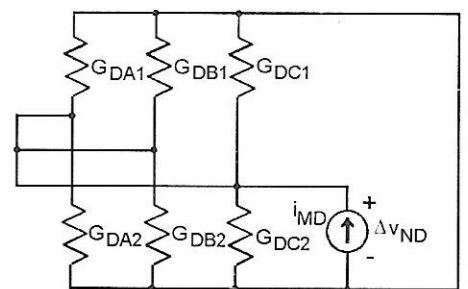


Figura 8 : Equivalente para equenos sinais da parte não-linear.

O valor do resíduo de corrente  $i_{MD}$  é comparado com a tolerância. Se for maior que ela, corrige-se a tensão  $e_{ND}$  injetando-se a corrente  $i_{MD}$ , com as fontes  $e_{AB}$ ,  $e_{BC}$  e  $e_{LD}$  mortas (curto-circuitadas) e as válvulas representadas pelos seus equivalentes para pequenos sinais (Figura 8), a correção da fonte  $e_{ND}$ ,  $\Delta e_{ND}$ , é a tensão entre os terminais da fonte de corrente  $i_{MD}$ . A convergência é obtida em poucas iterações.

As correntes residuais, Eqs. (7), (8) e (9), serão as excitações para o circuito equivalente linearizado do conversor CA/CC, como mostrado na Figura 9. As tensões entre os terminais das fontes de corrente residuais neste circuito são as correções para serem adicionadas às tensões  $e_{AB}$ ,  $e_{BC}$  e  $e_{LD}$ .

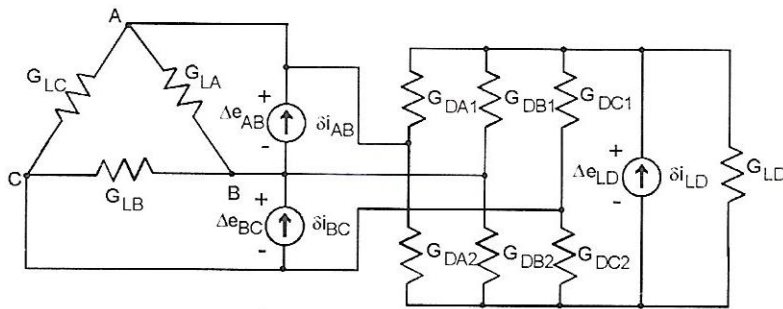


Figura 9 : Equivalente linearizado do conversor CA/CC.

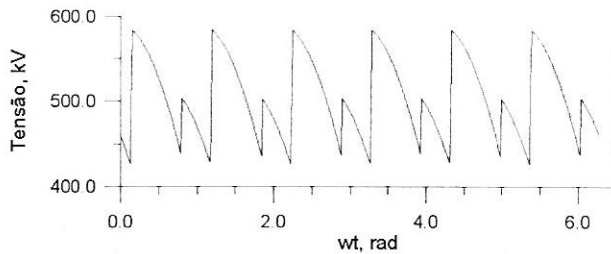
O processo iterativo continua até a convergência. É importante observar que existem dois processos iterativos nesse algoritmo. O principal processo (externo) determina a redução progressiva das correntes residuais  $\delta i_{AB}$ ,  $\delta i_{BC}$  e  $\delta i_{LD}$ , enquanto o processo secundário (interno) determina as correntes da parte não-linear  $i_{NA}$ ,  $i_{NB}$  e  $i_{ND}$ .

#### 4. Resultados e Discussões

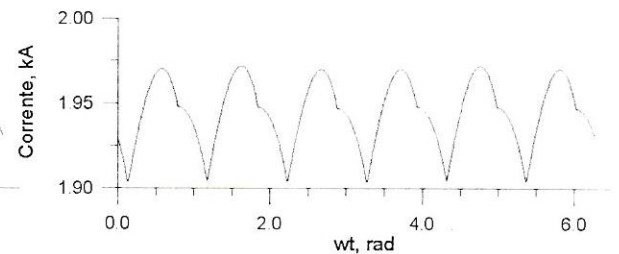
A resposta em regime permanente do conversor CA/CC de 6 pulsos foi calculada usando-se a técnica proposta. O número de passos de tempo por período fundamental foi escolhido para ser 512, que é adequado para o cálculo do transitório, bem como para a análise de harmônicas nas formas-de-onda em regime permanente usando FFT. Durante as simulações computacionais foi usada aritmética de dupla precisão.

Os parâmetros do conversor CA/CC de 6 pulsos usados nas simulações foram adaptados de [2]. Esses parâmetros são :  $R_G=0,1\Omega$ ,  $L_G=0,216H$ ,  $R_D=5\Omega$ ,  $L_D=0,82888H$ ,  $E_G=426,9114V$  (l-l),  $E_{DC}=495kV$ ,  $f=60Hz$  e  $\alpha=15^\circ$ . Os instantes de engatilhamento das válvulas são sincronizados com os ângulos de condução natural das tensões entre fases do sistema CA, que são determinados antes do início do processo iterativo. A tolerância da corrente residual foi ajustada em  $10^{-6}$ .

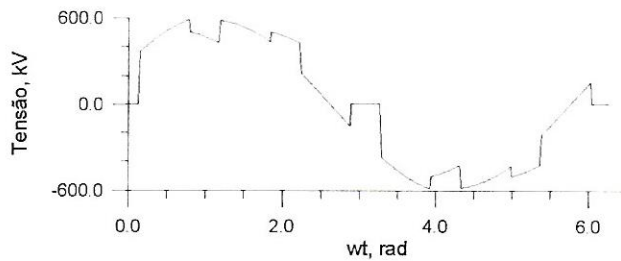
As Figuras 10 a 13 mostram as tensões e correntes nos lados CA e CC para o caso da tensão da fonte sem distorção.



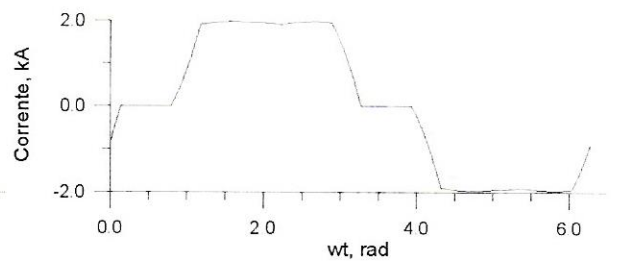
**Figura 10 : Tensão do lado CC.**



**Figura 11 : Corrente no lado CC.**



**Figura 12 : Tensão no lado CA.**



**Figura 13 : Corrente no lado CA.**

## 5. Conclusões

Um novo método para análise de circuitos não-lineares foi apresentado, com aplicação na obtenção da resposta em regime permanente de um conversor CA/CC de 6 pulsos. A nova técnica de análise é geral, no domínio do tempo, e é baseada no método de Newton. A mesma permite a simulação de circuitos não-lineares tanto em regime transitório como em regime permanente. Os elementos não-lineares podem ser modelados de forma completa, podendo ser incluídos também sistemas de controle para promover o engatilhamento das válvulas da ponte. A técnica se mostra muito flexível, permitindo o acesso a qualquer ponto do circuito em estudo e é rapidamente convergente.

## 6. Referências Bibliográficas :

- [1] MOHAN, N., UNDELAND, T. M. & ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [2] SMITH, B. C., WATSON, N. R. et al. **Steady State Model of the AC/DC Converter in the Harmonic Domain**. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 142, n. 2, March, 1995, pp. 109-118.

- [3] CARPINELLI, G., GAGLIARDI, F. et al. **Generalised Converter Models for Iterative Harmonic Analysis in Power Systems.** IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 141, n. 5, September, 1994, pp. 445-451.
- [4] NAIDU, S. R. & TRINDADE, W. J. **A Rapidly Convergent Technique for Determining the Response of AC/DC Converters.** ICHQP VIII, Atenas, 1998, pp. 958-963.