

ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS NÃO-LINEARES: O CASO DO CONVERSOR CA/CC DE 12 PULSOS

Walmeran José Trindade Júnior

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba

e-mail: walmeran@uol.com.br

Resumo

Neste trabalho é mostrada a análise do conversor CA/CC de 12 pulsos através da técnica das fontes fictícias de tensão para a análise de circuitos elétricos não-lineares descrita em [1], [2], [3] e [4]. As respostas em regime permanente para as tensões e correntes dos subsistemas CA e CC são apresentadas. Apesar da dimensão e da complexidade do circuito, a técnica mostrou-se eficiente computacionalmente e de claro entendimento analítico.

Palavras-chave: Circuitos não-lineares. Conversor CA/CC de 12 pulsos.

1. Introdução

A resposta do conversor CA/CC de 12 pulsos em regime permanente é determinada através da aplicação da nova metodologia de análise de circuitos elétricos não-lineares mostrada em [1], [2], [3] e [4].

O sistema CA do conversor é modelado através de circuitos equivalentes do tipo R-R-L, sendo balanceado e conectado em estrela aterrada, como são também os primários dos dois transformadores Y-Y e Y- Δ . Um filtro passa-baixa e outro passa-alta formam os filtros de harmônicas ligados ao barramento CA juntamente com um banco de capacitores para correção de fator de potência. O sistema CC é representado através do circuito T equivalente, sendo o inversor substituído por uma fonte de tensão constante e o conversor, propriamente dito, é formado por duas pontes de seis válvulas, em série, configurando a operação de 12 pulsos. Essas válvulas são individualmente gatilhadas durante cada período da frequência fundamental, permanecendo cada válvula bloqueada desde seu ponto natural de gatilhamento até seu instante de disparo. No restante do período, a válvula assume um comportamento como um diodo não-ideal.

Por opção, a análise do conversor CA/CC de 12 pulsos é feita sem o sistema de controle da corrente CC, embora o contrário possa ser feito sem grandes alterações no procedimento de cálculo.

3. Análise do Conversor CA/CC de 12 pulsos

A Figura 1 mostra o conversor CA/CC de 12 pulsos com as fontes de tensão fictícias e_{A1} , e_{B1} , e_{C1} , e_{AB2} , e_{BC2} , e_{LD1} e e_{LD2} conectadas de acordo com a nova técnica de análise descrita em [1], [2], [3] e [4] (o detalhamento do circuito pode ser encontrado em [6]). As fontes fictícias de tensão separam o conversor em duas partes lineares, compreendendo os subsistemas CA e CC, e uma parte não-linear correspondendo às doze válvulas.

A análise das partes lineares dá as correntes i_{ST1A} , i_{ST1B} , i_{ST1C} , i_{ST2A} , i_{ST2C} e i_{D1} . As

correntes i_{NA1} , i_{NB1} , i_{NC1} , i_{NA2} , i_{NC2} , i_{ND1} e i_{ND2} 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 :

$$\delta i_{kN1} = i_{ST1k} - i_{Nk1} \quad (1)$$

para $k = A, B, C$.

$$\delta i_{AB2} = -i_{ST2AB} + i_{ST2CA} - i_{NA2}, \quad (2)$$

$$\delta i_{BC2} = -i_{ST2BC} + i_{ST2CA} + i_{NC2}, \quad (3)$$

$$\delta i_{LD1} = i_{ND1} - i_{D1}, \quad (4)$$

$$\delta i_{LD2} = i_{ND2} - i_{D1}. \quad (5)$$

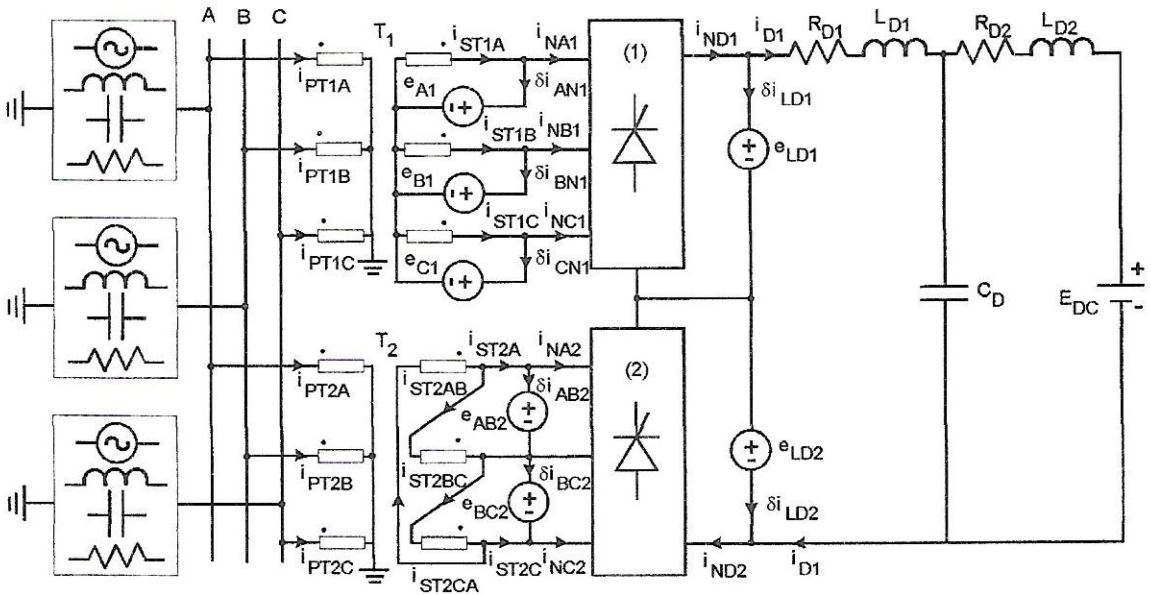


FIGURA 1: CONVERSOR CA/CC DE 12 PULSOS.

A análise da parte não-linear necessita da aplicação recursiva da técnica proposta, pelo fato de não ser possível o cálculo das tensões em todas as válvulas. Esse cálculo só é possível quando se conhece de antemão a tensão em pelo menos uma das válvulas de cada ponte. As tensões nas válvulas são necessárias para a determinação das correntes em cada uma delas, através da característica V-I, culminando com o cálculo das correntes da parte não-linear. Assim, duas novas fontes fictícias de tensão são aplicadas, uma em cada ponte, e um novo processo iterativo é iniciado. A Figura 2 ilustra a conexão das fontes fictícias de tensão na parte não-linear. Com os valores de tensão nas válvulas determinados, calculam-se as suas correntes e condutâncias através da curva característica $i = f(v)$ e $G_D = \frac{\partial i}{\partial v}$.

Não sendo verificado o critério de convergência, que seleciona o maior resíduo e compara com a tolerância especificada, o processo iterativo principal prossegue com a correção das fontes fictícias de tensão. Para a correção dessas fontes, os resíduos de corrente são injetados no circuito com sentido contrário aos das fontes fictícias de tensão (Figura 3), sendo as outras fontes de tensão e de corrente mortas, e os elementos não-lineares substituídos pelos seus equivalentes dinâmicos. A correção a ser aplicada nas fontes fictícias de tensão é a diferença de potencial em cada fonte de corrente residual respectiva.

Após a convergência, as fontes de corrente fictícias dos modelos discretos dos elementos

reativos (regra de integração Euler regressivo) são atualizadas, seguindo o cálculo para o próximo ponto, conforme o passo de tempo especificado.

Esse é o procedimento para a análise do conversor CA/CC de 12 pulsos Cigré Benchmark em regime transitório. Para a obtenção da resposta em regime permanente do conversor CA/CC de 12 pulsos, as fontes de tensão fictícias $e_{A1}(t)$, $e_{B1}(t)$, $e_{C1}(t)$, $e_{AB2}(t)$, $e_{BC2}(t)$, $e_{LD1}(t)$ e $e_{LD2}(t)$, Figura 1, são periodicamente variantes no tempo.

As correntes das partes lineares $i_{ST1A}(t)$, $i_{ST1B}(t)$, $i_{ST1C}(t)$, $i_{ST2A}(t)$, $i_{ST2C}(t)$ e $i_{D1}(t)$, necessárias para o cálculo dos resíduos de corrente nas fontes fictícias de tensão, são obtidas através da versão linear do algoritmo de Aprille e Trick [5].

Na parte não-linear, são determinadas as correntes periódicas $i_{NA1}(t)$, $i_{NB1}(t)$, $i_{NC1}(t)$, $i_{NA2}(t)$, $i_{NC2}(t)$, $i_{ND1}(t)$ e $i_{ND2}(t)$, bem como as resistências equivalentes variantes no tempo das válvulas.

Os resíduos periódicos de corrente $\delta i_{AN1}(t)$, $\delta i_{BN1}(t)$, $\delta i_{CN1}(t)$, $\delta i_{AB2}(t)$, $\delta i_{BC2}(t)$, $\delta i_{LD1}(t)$ e $\delta i_{LD2}(t)$ que fluem pelas fontes de tensão fictícias $e_{A1}(t)$, $e_{B1}(t)$, $e_{C1}(t)$, $e_{AB2}(t)$, $e_{BC2}(t)$, $e_{LD1}(t)$ e $e_{LD2}(t)$, respectivamente, são então calculados.

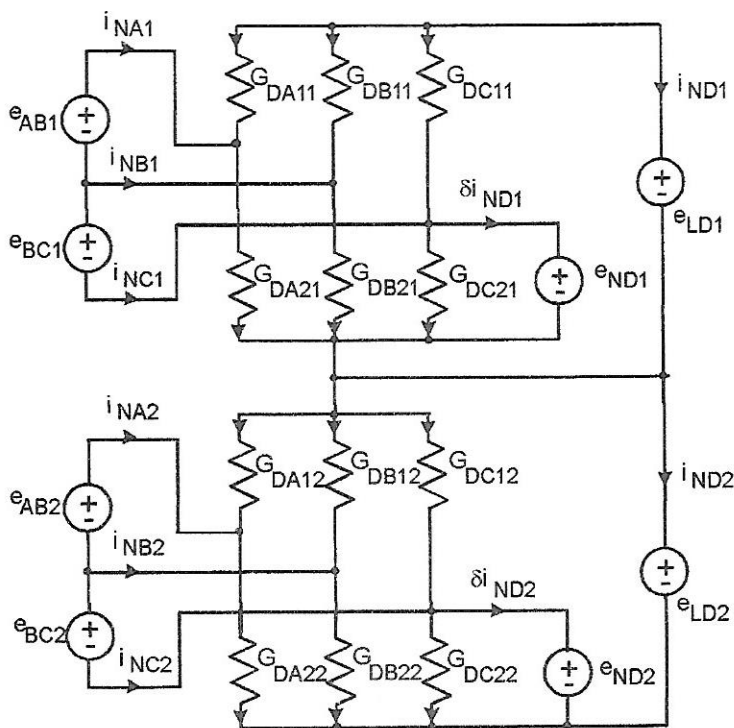


FIGURA 2: PARTE NÃO-LINEAR – CONEXÃO DAS FONTES FICTÍCIAS DE TENSÃO.

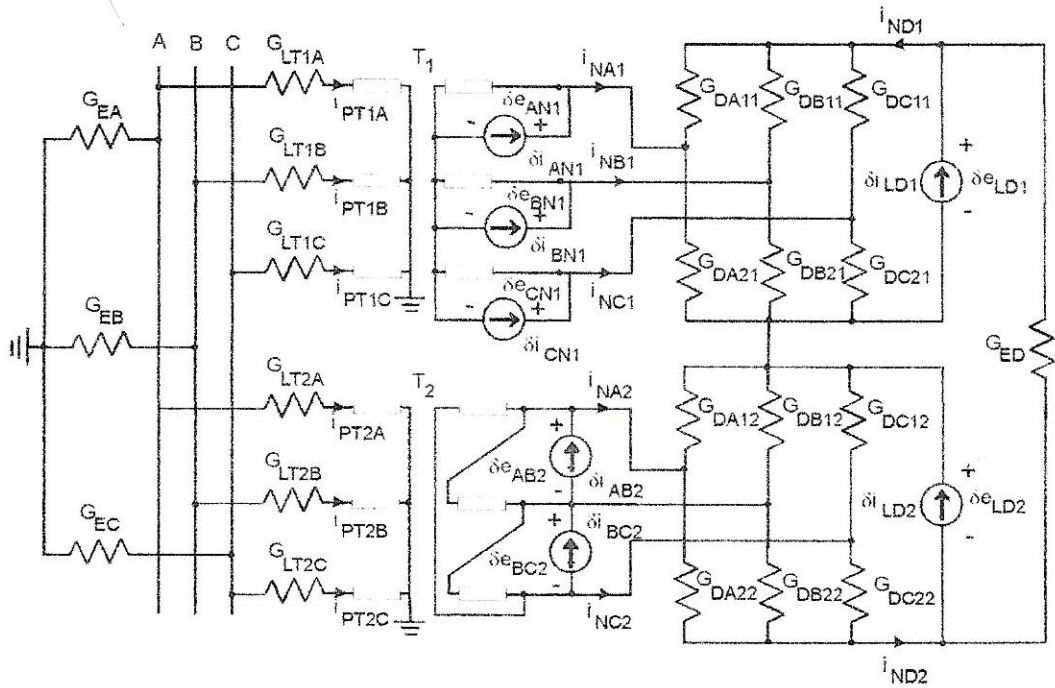


FIGURA 3: CORREÇÃO DAS FONTES FICTÍCIAS DE TENSÃO.

As correções periódicas para as fontes de tensão fictícias $\Delta e_{A1}(t)$, $\Delta e_{B1}(t)$, $\Delta e_{C1}(t)$, $\Delta e_{AB2}(t)$, $\Delta e_{BC2}(t)$, $\Delta e_{LD1}(t)$ e $\Delta e_{LD2}(t)$ são obtidas a partir do circuito equivalente linearizado, idêntico ao da Figura 3. Porém, as excitações deste circuito são os resíduos periódicos de corrente, e as válvulas são substituídas por resistências variantes no tempo e periódicas. Assim, o circuito equivalente para pequenos sinais é linear, muito embora variante no tempo. Daí, a sua resposta em regime permanente pode ser determinada com uma iteração do algoritmo de Aprille e Trick.

As tensões periódicas entre os terminais das fontes de corrente residuais no circuito equivalente para pequenos sinais são as correções a serem adicionadas às fontes de tensão fictícias e a próxima iteração e processo iterativo podem continuar. O teste de convergência é baseado no valor rms normalizado das formas-de-onda dos resíduos de corrente $\delta i_{AN1}(t)$, $\delta i_{BN1}(t)$, $\delta i_{CN1}(t)$, $\delta i_{AB2}(t)$, $\delta i_{BC2}(t)$, $\delta i_{LD1}(t)$ e $\delta i_{LD2}(t)$.

3. Resultados e Discussões:

A resposta em regime permanente do conversor CA/CC de 12 pulsos é calculada usando-se a técnica proposta. Um microcomputador compatível com IBM-PC com processador de 200 MHz é utilizado em todas as computações. O número de passos de tempo por período fundamental é igual a 512, que é adequado para o cálculo do transitório (passo de tempo de 32,552µs), bem como para a análise de harmônicas nas formas-de-onda em regime permanente usando FFT. Durante as simulações computacionais é usada aritmética de dupla precisão. A regra de integração Euler regressivo é utilizada para compor os equivalentes discretos dos elementos reativos do circuito do conversor. A curva característica das válvulas é assim adotada :

$$G_{on} = 250,0S, G_{off} = 0,2 \times 10^{-7} S, \quad (6)$$

$$I_{don} = G_{on} \cdot V_d, I_{doff} = G_{off} \cdot V_d. \quad (7)$$

Para assegurar a convergência, em cada iteração do procedimento de Newton-Raphson da

nova técnica tanto em regime transitório quanto em regime permanente, somente uma fração da correção é adicionada para aproximar a solução, ou seja, $v_D^{k+1} = v_D^k + q\Delta v_D^k$, onde $0 < q \leq 1$. O valor ótimo de q é obtido através de busca unidimensional usando-se a fórmula de recorrência

$$q = 1 / (1,2^{k-1}), \text{ p/ } k = 1, \dots, 50. \quad (8)$$

O valor de q é ótimo quando a aproximação da solução calculada com ele gera um erro das correntes residuais mínimo. Este procedimento aumenta o tempo de computação, porém assegura a convergência.

Os parâmetros do conversor CA/CC de 12 pulsos usado nas simulações foram obtidos em [3]. Nas simulações, o gatilhamento das válvulas é feito a ângulo constante e igual a 15° (sem sistema de controle). Os instantes de gatilhamento das válvulas são sincronizados com os ângulos de condução natural das tensões entre fases do sistema CA que são aplicadas diretamente a cada ponte.

As formas-de-onda iniciais das fontes periódicas de tensão fictícias $e_{A1}(t)$, $e_{B1}(t)$, $e_{C1}(t)$, $e_{AB2}(t)$, $e_{BC2}(t)$, $e_{LD1}(t)$ e $e_{LD2}(t)$ são necessárias para dar partida ao processo iterativo da solução em regime permanente. Alguns ciclos de transitório são calculados para tal fim. São necessários 14 ciclos para estimar o regime permanente com fonte senoidal simétrica. A tolerância da corrente residual foi ajustada em 10^{-5} .

As Figuras 4 a 7 mostram as tensões e correntes nos lados CA e CC para o caso da tensão da fonte sem distorção (senoidal).

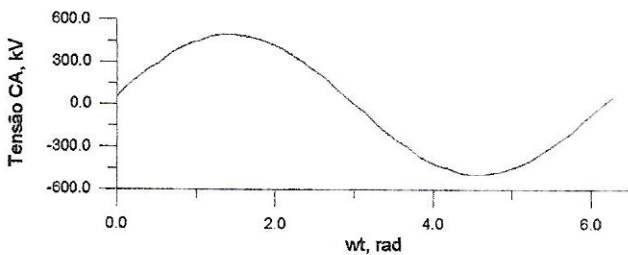


FIGURA 4: TENSÃO NO SUBSISTEMA CA.

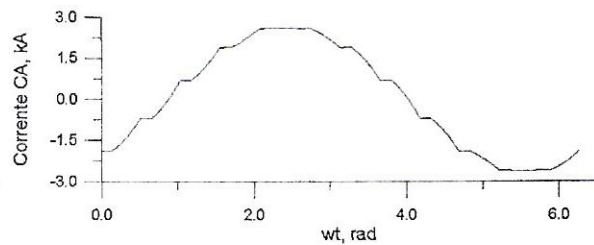


FIGURA 5: CORRENTE NO SUBSISTEMA CA.

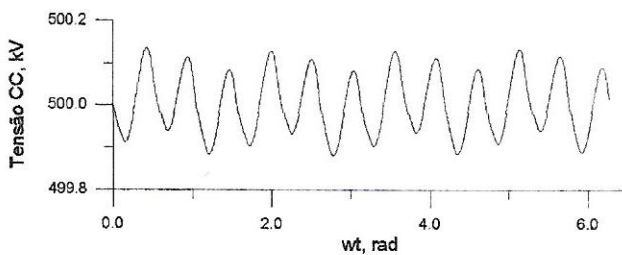


FIGURA 6: TENSÃO NO SUBSISTEMA CC.

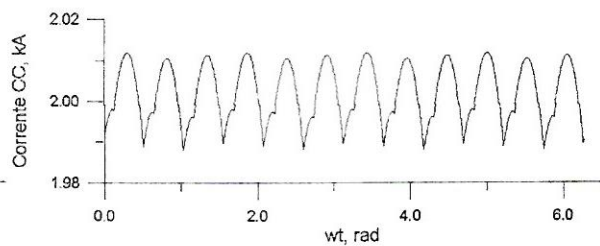


FIGURA 7: CORRENTE NO SUBSISTEMA CC.

4. Conclusões:

A aplicação da técnica das fontes fictícias de tensão para a obtenção das respostas em regimes transitório e permanente do conversor CA/CC de 12 pulsos mostrou-se eficiente e de claro entendimento analítico. Eficiente, devido ao pouco tempo de simulação requerido, levando-se em consideração a complexidade do circuito, para se obter o regime permanente do circuito (4,72 segundos para o caso senoidal). A eficiência também revelou-se no aspecto da convergência numérica. Mesmo o circuito contendo 12 elementos não-lineares (as 12 válvulas das pontes) e

exigindo-se uma tolerância de 10^{-5} para convergência, isso foi conseguido com rapidez. Facilidade de entendimento analítico, apesar da complexidade natural do circuito do conversor CA/CC de 12 pulsos, que exigiu um total de sete fontes de tensão fictícias para separar o circuito nas partes linear e não-linear, o seu tratamento analítico dispensa maiores complicações para realizar-se. O que não acontece, por exemplo, nas soluções propostas em [6], [7] e [8].

5. Referências Bibliográficas:

- [1] TRINDADE, W. J. **Análise de circuitos elétricos não-lineares: o caso do conversor CA/CC de 6 pulsos.** Principia, n.8, setembro, 2000, p. 11-17.
- [2] NAIDU, S. R. & TRINDADE, W. J. **A rapidly convergent technique for determining the response of AC/DC converters.** ICHQP VIII, Atenas, 1998, p. 958-963.
- [3] _____. **An efficient technique for determining the responses of nonlinear circuits.** IPST99, Budapest, 1999, p. 590-595.
- [4] NAIDU, S. R., LIMA, A. M. N. & TRINDADE, W. J. **methodology for simulating the response of nonlinear power circuits.** IEE Proceedings of Generation Transmission Distribution, vol. 146, n. 6, November 1999, p. 568-572.
- [5] APRILLE, T. J. & TRICK, T. N. **Steady-state analysis of nonlinear circuits with periodic inputs.** Proceedings of IEEE, vol. 60, n. 1, January, 1972, p. 108-114.
- [6] PERKINS, B. K. **Steady-state solution of the hvdc converter including AC/DC system interaction by a direct method.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n. 4, 1999, p. 1454-1460.
- [7] SMITH, B. C., WATSON, N. R. et al. **A Newton solution for the harmonic phasor analysis of AC/DC converters.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, n. 2, April, 1996, p. 965-971.
- [8] CARPINELLI, G., GAGLIARDI, F. et al. **Generalised convertor models for iterative harmonic analysis in power systems.** IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, n. 5, September, 1994, p. 445-451.