

MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM CONVERSOR CA-CC

Raoni de Araújo Pegado¹; Karcus Marcelus Colaço Dantas².

¹Aluno da Universidade Federal de Campina Grande, raoni.pegado@ee.ufcg.edu.br;

²Professor D. Sc. da Universidade Federal de Campina Grande, karcus@dee.ufcg.edu.br.

RESUMO: Neste trabalho foi destacada a importância das simulações digitais para a análise de sistemas elétricos. Como exemplo, foi aplicada a técnica de simulação em tempo real em um conversor CA-CC. Os conversores CA-CC são dispositivos eletrônicos essenciais nas fontes de alimentação de equipamentos que exigem tensão contínua na sua entrada de alimentação. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados de retificadores. Desse modo, o foco de estudo está concentrado na modelagem de retificador trifásico de ponte completa a partir da versão estudante do *software Matlab®*, utilizando técnicas aplicadas na simulação digital para transitórios eletromagnéticos. Essas técnicas permitem a modelagem de circuitos com alta frequência de chaveamento com um passo de tempo para a simulação entre 1,5 μ s e 2,5 μ s.

Palavras-chave: Simulações digitais, modelagem, conversor CA-CC, retificador, tempo real.

1 INTRODUÇÃO

Em engenharia elétrica, à medida que a complexidade dos sistemas elétricos aumenta, fica mais difícil obter uma solução analítica que represente seu comportamento. Portanto, a utilização de ferramentas computacionais para análise de sistemas elétricos por meio de simulações digitais está cada vez mais difundida. Sua utilização permite realizar uma análise comparativa entre os resultados teóricos baseados em modelos matemáticos com a parte experimental, facilitando a tomada de decisões e possibilitando melhorias para o projeto. Essa técnica é bastante difundida tanto no âmbito acadêmico como profissional, por apresentar uma solução economicamente barata além de permitir que sejam realizados testes antes da construção de algum projeto, podendo evitar, por exemplo, erros que comprometam a integridade do sistema projetado.

Para realizar as simulações digitais é necessário obter um modelo discreto do sistema estudado. Neste caso, a simulação dos circuitos elétricos lineares é feita convertendo-se as equações diferenciais, que relacionam tensão e corrente nos elementos de circuito, por relações algébricas (equações de diferença). A partir da aplicação de métodos de integração numérica, cada elemento de circuito é representado por um circuito equivalente discreto que consiste em um resistor em paralelo com uma fonte de corrente calculada a cada passo de tempo da simulação (DOMMEL, 1969).

O estudo de métodos de integração numérica é de extrema importância para a compreensão de simulações digitais, de transitórios eletromagnéticos em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). A partir dos métodos de integração numérica, a integral de uma função é calculada mediante fórmulas aproximadas (BEWLEY, 2001). Todavia, a discretização de uma função causa erros de truncamento, o que pode ocasionar problemas de instabilidade numérica (JR, 1967). Por esta razão, uma das regras mais utilizadas em programas do tipo EMTP é a regra de integração trapezoidal, uma vez que essa regra é numericamente estável e suficientemente precisa (DOMMEL; MEYER, 1974). Sua equação é dada por:

$$\int_{t-\Delta t}^t f(t)dt = \frac{\Delta t}{2} [f(t) + f(t - \Delta t)]. \quad (1)$$

No que diz respeito às simulações digitais, estas podem ser classificadas em simulação tradicional e simulação em tempo real. A simulação tradicional não consegue replicar as condições reais de operação de um sistema real que está sendo simulado. Dessa forma, para conseguir obter tais condições, utilizam-se as simulações em tempo real. Estas possibilitam que modelos dinâmicos e/ou sistemas de controle possam ser testados sob as condições reais de operação, permitindo aumentar o grau de realismo das simulações e possibilitando o acesso a operações de *hardware* reais (SILVA, 2014).

O dispositivo escolhido para a simulação foi o conversor CA-CC, que tem por finalidade converter corrente alternada em corrente contínua. Devido o fornecimento de energia elétrica ser feito em corrente alternada, algumas cargas, por exemplo, equipamentos eletrônicos, exigem uma tensão contínua para alimentá-las, deste modo é necessário interligar este tipo de conversor a suas entradas de alimentação. Estes dispositivos conversores são chamados de retificadores de tensão, pois sua principal função é retificar a tensão alternada aplicada na sua entrada entregando tensão contínua na sua saída.

Devido aos componentes de chaveamento presentes em seus circuitos elétricos, os conversores apresentam uma característica não linear. Tal característica faz com que suas simulações requeiram um passo de tempo muito pequeno. Para solucionar este problema, foi apresentada uma técnica para a modelagem dos componentes de chaveamento (diodos, transistores, etc.) representando-os por uma chave com comutação em alta frequência. Tal representação torna possível a utilização de um passo de tempo de simulação entre 1,5 μ s e 2,5 μ s sem ocasionar esforços computacionais.

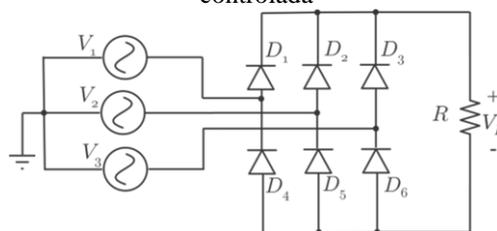
Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo o estudo e modelagem para simulação em tempo real de um conversor bastante utilizado na eletrônica de potência, o retificador trifásico de ponte completa. Ao longo do artigo será apresentada a estrutura de retificador tomado como exemplo, bem como os conhecimentos iniciais necessários para obter o modelo discreto deste conversor. Modelo este, baseado no algoritmo de Dommel (1969) e no modelo discreto de uma chave de alta frequência (MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005), (PEJOVIC; MAKSIMOVIC, 1994), (HUI; CHRISTOPOULOS, 1990).

2 RETIFICADOR TRIFÁSICO DE PONTE COMPLETA

Os retificadores podem ser classificados de acordo com sua capacidade de ajuste da tensão na sua saída, em controlados e não controlados. Os retificadores não controlados utilizam diodos como elementos de retificação, portanto as características da tensão na saída não podem ser modificadas durante a operação. Enquanto os retificadores controlados utilizam tiristores ou transistores, os quais podem modificar as características da tensão na saída do retificador durante a operação. Para este trabalho, a fim de facilitar o entendimento, a estrutura escolhida para análise foi o retificador trifásico de ponte completa com tensão de saída não controlada, pois este apresenta características de funcionamento bem mais simples quando comparadas as do retificador de tensão controlada.

O retificador trifásico de onda completa, conhecido como ponte de Graetz, é um dos retificadores mais utilizados industrialmente. Este retificador apresenta seis etapas de operação ao longo de um período da rede, sendo que em cada etapa ocorre à condução de um par de diodos. Em cada instante a corrente da carga flui por um diodo da parte superior (D_1 , D_2 ou D_3) e um da parte inferior (D_4 , D_5 , ou D_6). Sua estrutura é ilustrada pela Fig. 1.

Figura 1 - Retificador trifásico de ponte completa com tensão controlada



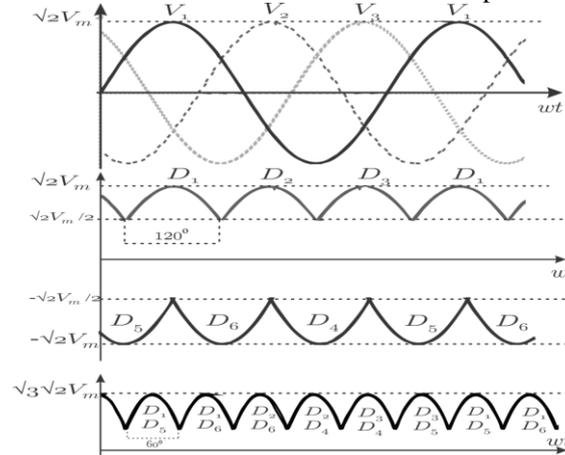
Fonte: Os autores

Observando as formas de onda da Fig. 2, pode-se observar que o intervalo de condução de cada diodo é de 120° e a cada 60° ocorre uma comutação de um dos dois diodos que estão conduzindo simultaneamente.

A tensão média na carga é dada pela expressão:

$$V_{Rmed} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}\sqrt{2}V_m \text{sen}(\omega t) dt \cong 2,34V_m \quad (2)$$

Figura 2 - Formas de ondas do retificador trifásico ponte de Greatz



Fonte: Os autores

O retificador trifásico de ponte completa apresenta vantagens em relação a outros tipos de retificadores. Este tipo de retificador apresenta maior tensão de saída para uma mesma tensão de entrada e uma frequência da componente fundamental da tensão seis vezes a frequência das tensões de alimentação.

3 CIRCUITOS DISCRETOS EQUIVALENTES

Com base em obter o modelo do conversor estudado, são apresentados os circuitos equivalentes discretos para indutores, capacitores e resistores lineares, correspondentes à aplicação do método de integração trapezoidal.

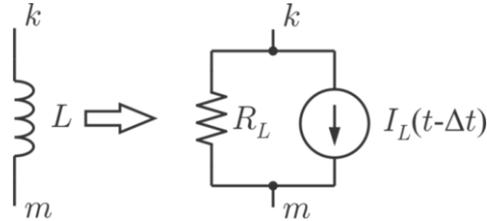
3.1 Indutância

A equação diferencial que descreve o comportamento de um indutor linear é expressa por:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (3)$$

A partir da aplicação do método de integração trapezoidal (ARAÚJO; NEVES, 2005), cada elemento de circuito é representado por um circuito equivalente discreto, que consiste em um resistor em paralelo com uma fonte de corrente calculada de tempo em tempo e dependente da corrente do tempo passado, $t - \Delta t$ (DOMMEL, 1969), como ilustrado na Fig. 3.

Figura 3 - Indutor linear e seu circuito discreto da indutância



Fonte: Os autores

As equações para a fonte de corrente e resistor em paralelo que representam o indutor na Fig. 3 são:

$$I_L(t - \Delta t) = \frac{V_{km}(t-\Delta t)}{R_L} + i_{Lkm}(t - \Delta t). \quad (4)$$

$$R_L = \frac{2L}{\Delta t}. \quad (5)$$

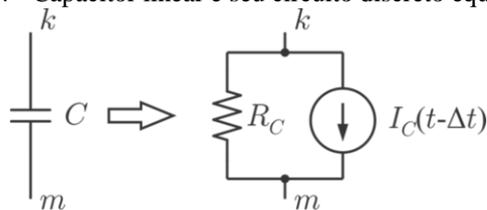
3.2 Capacitância

Considerando um capacitor linear, a equação que descreve seu comportamento é expressa por:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}. \quad (6)$$

De forma análoga ao indutor, após a aplicação do método de integração trapezoidal, o capacitor é representado por uma fonte de corrente fictícia $I_C(t - \Delta t)$ dependente de valores passados do circuito e uma resistência R_C conectadas em paralelo, conforme é mostrado na Fig. 4.

Figura 4 - Capacitor linear e seu circuito discreto equivalente



Fonte: Os autores

As equações para a fonte de corrente e resistor em paralelo que representam o capacitor na Fig. 4 são

$$I_C(t - \Delta t) = -\frac{V_{km}(t-\Delta t)}{R_L} - i_{Ckm}(t - \Delta t). \quad (7)$$

$$R_C = \frac{\Delta t}{2C}. \quad (8)$$

3.3 Resistência

A equação que descreve o comportamento de um resistor linear conectado entre os nós k e m é dada por:

$$R = \frac{v(t)}{i(t)}. \quad (9)$$

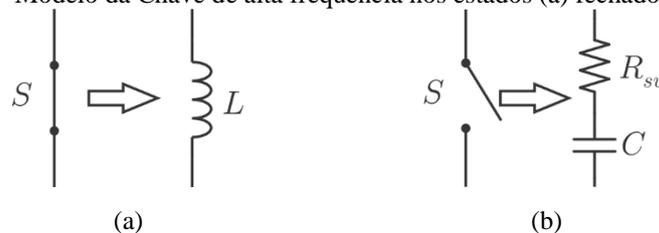
Como a relação entre tensão e corrente para o resistor já é uma relação algébrica, o circuito equivalente para o resistor é o próprio resistor.

4 REPRESENTAÇÃO E MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO

Pelo circuito do conversor proposto para a análise, temos observado que o diodo porta-se como uma chave, e seus estados (aberta ou fechada) são alterados de acordo com sua polarização. Normalmente uma chave é modelada como uma resistência cujo valor depende de seu estado. Quando a chave encontra-se aberta, a resistência possui valor elevado, e quando se encontra fechada, o valor da resistência é praticamente desprezível. Porém, devido ao esforço computacional, este modelo não é apropriado para simulação em tempo real de chaves que possuem uma alta frequência de chaveamento. Por esta razão, é necessária uma nova representação para este tipo de dispositivo.

Com base no algoritmo de Dommel (1969), a representação da chave como uma resistência elevada para o circuito aberto pode ser substituída por um ramo *RC-série*. Da mesma forma substitui-se a representação de uma baixa resistência no circuito fechado por um indutor (PEJOVIC; MAKSIMOVIC, 1994),(HUI; CHRISTOPOULOS, 1990),(MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005), (MAGUIRE; FORSYTH; KUFFEL, 2005). A Fig. 5 ilustra a nova representação para o modelo da chave.

Figura 5 - Modelo da Chave de alta frequência nos estados (a) fechado e (b) aberto



Fonte: Os autores

Aplicando a regra de integração trapezoidal para nova representação do modelo da chave de alta frequência, os elementos de circuito são substituídos pelos seus respectivos modelos equivalentes discretos.

4.1 Determinação dos valores dos parâmetros de uma chave de alta frequência

A validade da aproximação da modelagem da chave é a preocupação mais premente; os valores de R_{sw} e C devem ser selecionados de modo que, juntos, representem uma elevada impedância. De modo semelhante, o valor de L deve ser selecionado de modo que represente uma impedância desprezível. Felizmente é possível determinar os valores de R_{sw} , L e C para essas restrições. A escolha de L e C é feita sob a condição que a perda mínima na comutação da chave seja igual à:

$$Cv^2 = \frac{1}{2}Li^2. \quad (10)$$

Com base nas limitações listadas acima, a seleção para L , C e R_{sw} usados para a modelagem de um dispositivo são dadas pelas equações abaixo, considerando δ , o fator de amortecimento (tipicamente 0,9) (PEJOVIC; MAKSIMOVIC, 1994), (HUI; CHRISTOPOULOS, 1990), (MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005), (MAGUIRE; FORSYTH; KUFFEL, 2005):

$$L = \sqrt{2}(F\Delta t)\frac{v}{i}. \quad (11)$$

$$C = \frac{(F\Delta t)^2}{L}. \quad (12)$$

$$R_{sw} = \frac{2L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2C}. \quad (13)$$

$$F = \frac{1}{2(\sqrt{\delta^2+1}-\delta)}. \quad (14)$$

Após a modelagem e seleção dos valores para os elementos, a solução do circuito analisado é obtida a cada passo de tempo (Δt) fazendo uso de técnicas de análise nodal (JÚNIOR, 2003), (NAIDU, 1985).

5 ANÁLISE E RESULTADOS

Foi desenvolvida uma rotina computacional a partir da versão estudante do *software Matlab®* para a simulação do retificador apresentado, utilizando o método de integração trapezoidal e modelando cada diodo como uma chave de alta frequência de chaveamento. O tempo total de

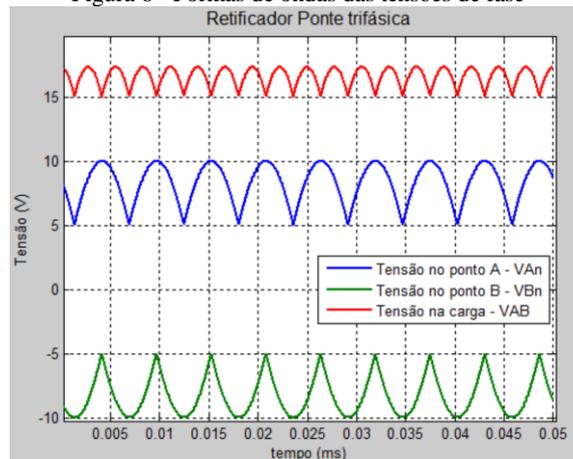
simulação utilizado foi de 50 ms, e foi considerado um passo de tempo igual a 1,5 μ s. Os valores dos elementos presentes nos retificadores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros para Simulação do retificador

$V_1 = 10\text{sen}(\omega t) \text{ V}$
$V_2 = 10\text{sen}(\omega t - 120^\circ) \text{ V}$
$V_3 = 10\text{sen}(\omega t + 120^\circ) \text{ V}$
$R = 500\Omega$

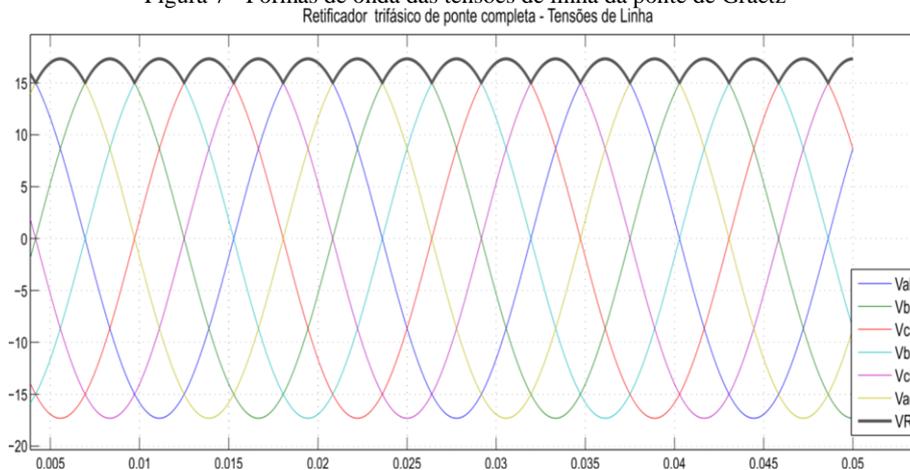
A partir da análise comparativa das formas de onda da tensão do retificador com as formas de onda obtidas na simulação, pôde-se notar que este tipo de modelagem apresentou uma simulação precisa e apropriada para aplicação em tempo real, conseguindo reduzir o passo de tempo sem que houvesse distorções nas formas de onda apresentadas para o circuito. A Fig. 6 e 7 ilustram as formas de onda das tensões de fase e linha obtidas na simulação para o retificador apresentado.

Figura 6 - Formas de ondas das tensões de fase



Fonte: Os autores

Figura 7 - Formas de onda das tensões de linha da ponte de Graetz



Fonte: Os autores

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi discutida a importância das simulações digitais como técnica de análise de sistemas elétricos. Essa técnica apresenta vantagens por se tratar de uma solução economicamente barata além de permitir que sejam realizados testes, antes da construção de algum projeto.

O modelo do diodo como uma chave com alta frequência de chaveamento permitiu a redução do passo de tempo de uma simulação em tempo real, resultando uma resposta mais precisa. E aplicando este modelo no circuito retificador apresentado, pôde-se constatar que o resultado da simulação foi satisfatório.

Devido aos resultados apresentados neste projeto, será estudada a aplicação deste modelo em dispositivos de chaveamento em alta frequência presentes em equipamentos de controle avançado de sistemas elétricos, baseados na eletrônica de potência. Como é o caso dos equipamentos do tipo *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS).

7 REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. E. D.; NEVES, W. L. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.
- BEWLEY, T. R. *Numerical methods in science and engineering*. UC San Diego, 2001.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase. *Networks IEEE*, v. 88, n. 4, p. 388–399, 1969.
- DOMMEL, H. W.; MEYER, W. S. Computation of electromagnetic transients. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 62, n. 7, p. 983–993, 1974.
- HUI, S.; CHRISTOPOULOS, C. A discrete approach to the modeling of power electronic switching networks. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 398–403, 1990.
- JR, F. H. B. Computer methods of network analysis. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 55, n. 11, p. 1787–1801, 1967.
- JÚNIOR, L. C. Z. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003.
- MAGUIRE, T.; FORSYTH, P.; KUFFEL, R. Small time-step ($< 2\mu\text{sec}$) vsc machine drives for the real time digital simulator. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Convertors and Systems (Electromacs 2005)*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 17–20.
- MAGUIRE, T.; GIESBRECHT, J. Small time-step ($< 2\mu\text{s}$) vsc model for the real time digital simulator. IPST, June, 2005.
- NAIDU, S. *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. Editora GRAFSET, Campina Grande, Brasil, 1985.
- PEJOVIC, P.; MAKSIMOVIC, D. A method for fast time-domain simulation of networks with switches. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 9, n. 4, p. 449–456, 1994.
- SILVA, E. L. *Estudo de técnicas para modelagem de Conversores Estáticos aplicadas à simulação em tempo real de sistemas fotovoltaicos conectados com a rede elétrica*. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.