

UTILIZAÇÃO DO SIMULINK NA SIMULAÇÃO DE RECTIFICADORES NÃO CONTROLADOS COM CARGA CAPACITIVA

V. SOARES¹, P. VERDELHO²

¹*Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.*

²*Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Portugal. Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, Portugal.*

O presente artigo tem por objectivo mostrar as potencialidades da utilização do software de simulação SimulinkTM funcionando em ambiente MatlabTM no ensino da electrónica de potência. Pretende-se realizar a simulação de rectificadores monofásicos e trifásicos não controlados com carga capacitiva através da síntese dos seus modelos de funcionamento, mostrando as potencialidades desta ferramenta de simulação sem recurso aos tradicionais simuladores analógico-digitais.

1. Introdução

Tradicionalmente, a simulação de circuitos de electrónica de potência é realizada recorrendo a simuladores específicos, tais como *IcapTM*, *PSpiceTM*, *SaberTM* ou outros [1] (Mohan, pág. 69). Estes programas recorrem com frequência ao algoritmo *Spice* (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Os resultados são obtidos com rapidez e exactidão apreciáveis, quer por introdução da lista de instruções representativa do circuito, quer pelo desenho do circuito na aplicação em causa. Não está em causa a fiabilidade da simulação obtida nestes programas, no entanto o *Simulink* permite um conhecimento mais profundo do comportamento dos circuitos de electrónica de potência dado necessitar dos modelos matemáticos de componentes ou partes de circuitos, descritos sob a forma de funções de transferência ou modelos de estado. A abordagem de simulação com o *Simulink* facilita ainda a síntese de controladores para os circuitos de electrónica de potência, algo que não sucede quando se recorre aos programas de simulação electrónica analógica-digital. Para além do aspecto didáctico, um dos campos de aplicação da simulação de rectificadores não controlados é o da sua utilização como cargas não lineares na compensação harmónica com filtros activos de potência [2], [3].

2. Síntese dos modelos

A primeira etapa a cumprir para a obtenção da simulação de um circuito de electrónica de potência consiste na obtenção dos modelos que descrevem o comportamento do circuito. Os circuitos propostos são o rectificador monofásico não controlado, ou seja, o rectificador em

ponte (*Graetz*) e o rectificador trifásico não controlado, ambos com carga RC e cujos esquemas se apresentam na figura 1. As variáveis $g_{r(i=1,2,3)}$ representam as funções de comando dos díodos encarados como interruptores de condução unidireccional. No rectificador monofásico, quando $g_{r1} = 1$ tem-se $g_{r2} = 0$ estando os díodos D_1 e D_4 à condução e D_2 e D_3 ao corte. As funções de comando g_{r1} e g_{r2} têm um funcionamento complementar. Para o rectificador trifásico uma função de comando $g_{r(i=1,2,3)} = 1$ indica que um díodo do topo do rectificador (D_1, D_2, D_3) se encontra à condução. Caso $g_{r(i=1,2,3)} = 0$ esses mesmos díodos estão ao corte. Os díodos da base do rectificador (D_4, D_5, D_6) têm um funcionamento complementar.

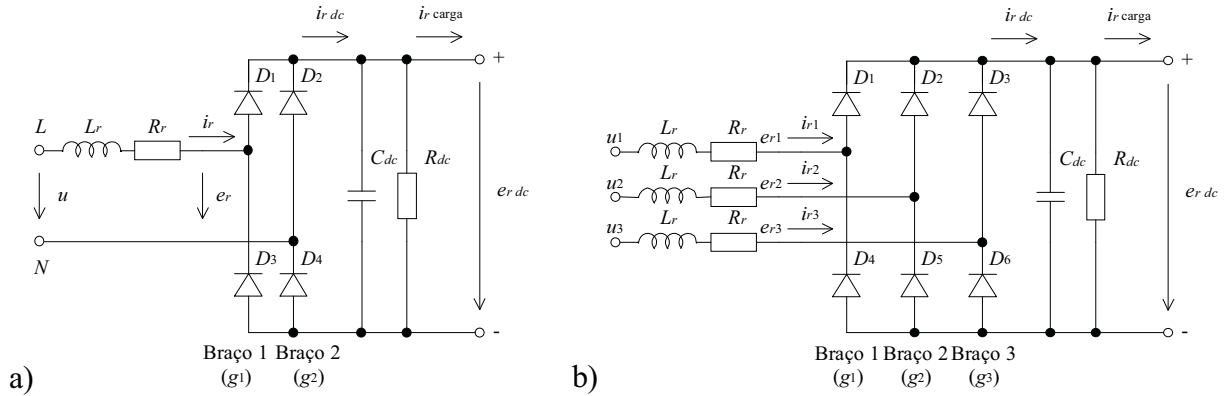


Figura 1: Rectificadores com carga RC: a) monofásico, b) trifásico.

A presença das indutâncias no lado alternado dos rectificadores é indispensável e tem por objectivo assegurar uma característica de fonte de corrente. É em função da corrente no lado alternado que se determina o estado das funções de comando dos díodos.

No rectificador monofásico as funções de comando são expressas por $g_{r1} = (1 + \text{SGN}(i_r))/2$ e $g_{r2} = (1 - \text{SGN}(i_r))/2$. A corrente no lado contínuo do rectificador e a tensão gerada no seu lado alternado são descritas por $i_{r_{dc}} = i_r \cdot \text{SGN}(i_r)$ e $e_r = e_{r_{dc}} \cdot \text{SGN}(i_r)$.

No caso do rectificador trifásico as funções de comando são dadas através de $g_{r123} = (1 + \text{SGN}(i_{r123}))/2$. As variáveis f_{r1} , f_{r2} e f_{r3} são funções de comutação auxiliares aplicadas exclusivamente ao rectificador trifásico, sendo definidas pela equação 1.

$$\mathbf{f}_{r123} = \begin{bmatrix} f_{r1} \\ f_{r2} \\ f_{r3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{r1} \\ g_{r2} \\ g_{r3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A corrente no lado alternado e tensão no lado contínuo do rectificador são, neste caso, dadas pelas equações 2.

$$i_{r_{dc}} = \mathbf{f}_{r123}^T \cdot \mathbf{i}_{r123} = \begin{bmatrix} f_{r1} & f_{r2} & f_{r3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{r123} = \mathbf{f}_{r123} \cdot \mathbf{e}_{r_{dc}} \equiv \begin{bmatrix} e_{r1} \\ e_{r2} \\ e_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{r1} \\ f_{r2} \\ f_{r3} \end{bmatrix} \cdot e_{r_{dc}} \quad (2)$$

As equações 3 e 4 traduzem os modelos de estado que descrevem o comportamento do rectificador monofásico, passíveis de ser implementadas em *Simulink*. Na figura 2 apresenta-se o respectivo modelo em *Simulink*.

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} u - \frac{1}{L_r} e_r \quad , \quad I_r = \frac{1/L_r}{s + R_r/L_r} \cdot (U - E_r) \quad (3)$$

$$\frac{de_{r_{dc}}}{dt} = -\frac{1}{R_r C_r} e_{r_{dc}} + \frac{1}{C_r} i_{r_{dc}} \quad , \quad E_{r_{dc}} = \frac{1/C_{dc}}{s + 1/R_{dc} C_{dc}} \cdot I_{r_{dc}} \quad (4)$$

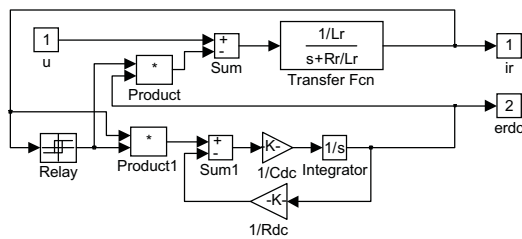


Figura 2: Modelos em *Simulink* usados na simulação do rectificador monofásico.

Note-se que na figura 2 não se encontra implementada a equação 4 dado não ser possível definir o valor inicial de tensão no condensador, portanto, é usado o diagrama em cadeia fechada que lhe dá origem. A equação 5, em conjunto com a equação 4, traduz o modelo de estado para o caso trifásico. As matrizes **A**, **B**, **C** e **D** são aplicadas nos modelos em *Simulink* do rectificador trifásico que se apresentam na figura 3.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{r123} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \mathbf{I}_{(3 \times 3)} \cdot \mathbf{i}_{r123} + \frac{1}{L_r} \cdot \mathbf{I}_{(3 \times 3)} \cdot (\mathbf{u}_{123} - \mathbf{e}_{r123}) \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \mathbf{I}_{(3 \times 3)} \quad , \quad \mathbf{B} = \frac{1}{L_r} \cdot \mathbf{I}_{(3 \times 3)} \quad , \quad \mathbf{C} = \mathbf{I}_{(3 \times 3)} \quad , \quad \mathbf{D} = 0 \quad (6)$$

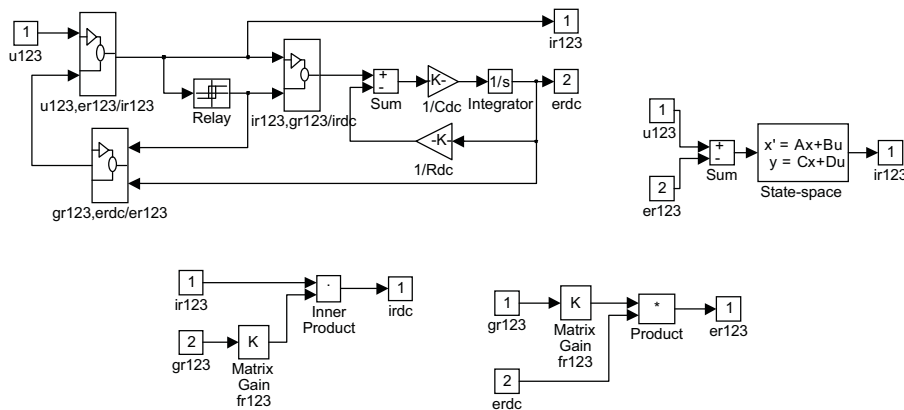


Figura 3: Modelos em *Simulink* usados na simulação do rectificador trifásico.

3. Resultados de simulação

A simulação foi realizada nas seguintes condições: $U = 50 \text{ V}_{\text{ef}}$, $f = 50 \text{ Hz}$; $R_r = 0,1 \Omega$, $L_r = 0,5 \text{ mH}$, $C_{dc} = 470 \mu\text{F}$ e $R_{dc} = 25 \Omega$. Foi utilizado o método de integração Runge-Kutta de 5.^a ordem, com um passo de integração variável, $\Delta t = 0,1$ a $2 \mu\text{s}$. Não foram encontrados problemas de convergência. Os resultados de simulação dos rectificadores são os que se apresentam na figura 4.

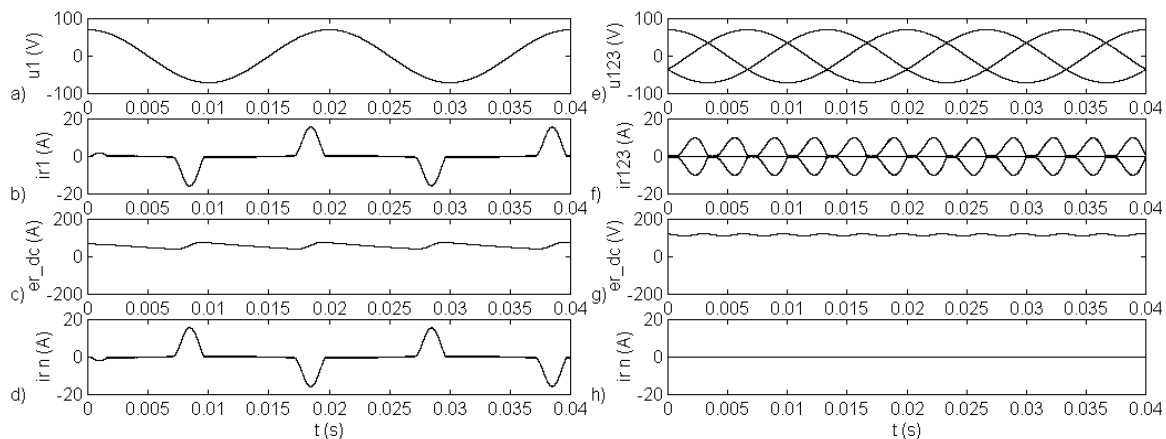


Figura 4: Resultados de simulação: - rectificador monofásico; a) tensão de fase u_1 , b) corrente de fase i_{r1} , c) tensão contínua $e_{r\ dc}$, d) corrente de neutro i_{rn} ; - rectificador trifásico, e) tensões de fase u_{123} , f) correntes de fase i_{r123} , g) tensão contínua $e_{r\ dc}$, h) corrente de neutro i_{rn} .

4. Conclusões

A utilização do *Simulink* reveste-se de particular importância do ponto de vista didático na simulação de conversores de electrónica de potência. Exige a modelização dos circuitos de electrónica, útil para a compreensão do seu modo de funcionamento, bem como para a eventual síntese de controladores. Os resultados obtidos são precisos e a convergência dos algoritmos de integração encontra-se assegurada em virtude das possibilidades de escolha do passo e do método de integração. A utilização do *Simulink* permite ainda, após o envio para o espaço de trabalho (*workspace*) das grandezas simuladas, determinar valores de potência, calcular espectros harmónicos ou realizar quaisquer outras operações de cálculo e tratamento disponíveis no *Matlab*.

Referências

- [1] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins. *Power Electronics*. John Wiley & Sons (1995)
- [2] V. Soares, P. Verdelho, G. Marques. *An Instantaneous Active and Reactive Current Component Method for Active Filters*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, n.º 4, 660-669 (2000).
- [3] V. Soares, P. Verdelho. *Active Power Filter with Neutral Current Compensation based on the Extension of the Instantaneous Active and Reactive Current Component i_d - i_q Method*. 8th European Conference on Power Electronics and Applications, P1-P10 (1999).