Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Centro Tecnológico – CTC
Departamento de Automação e Sistemas – DAS

Disciplina DAS 5109 – Modelagem e Simulação de Processos
Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira

Experimento de laboratório 1:
Controle de painel fotovoltaico com conversor CC-CC *buck*

(atualizado em 8 de março de 2023)

1 Introdução

Neste experimento iremos modelar, simular e controlar a operação de um painel fotovoltaico por meio de um conversor eletrônico CC-CC do tipo *buck* (rebaixador de tensão). O circuito do modelo ideal (sem perdas) do conversor é apresentado na Fig. 1. Nesse dispositivo, que pode ser considerado como o *atuador* no problema em questão, a chave (geralmente um IGBT, *insulated-gate bipolar transistor*) é acionada por um sinal PWM (*pulse width modulation*). Se considerarmos o sinal de chaveamento $D(t) \in \{0{,}1\} \subset \mathbb{N}$ tal que 0 e 1 significam chave aberta e fechada, respectivamente, teremos um comportamento de *modelo chaveado* do conversor em questão; por outro lado, se considerarmos $D(t) \in [0{,}1] \subset \mathbb{R}$ como a fração de tempo em que a chave permanece fechada (razão cíclica, ou *duty cycle* do sinal PWM), teremos o comportamento de *modelo médio* desse sistema dinâmico.

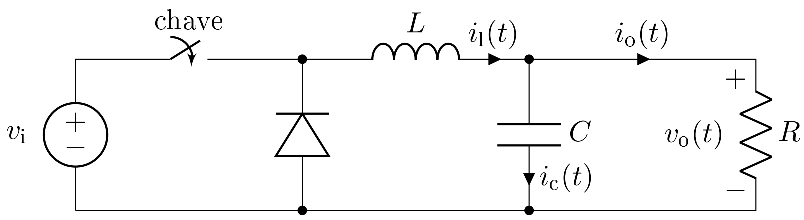

Figura 1: Circuito de um conversor CC-CC *buck* ideal para o controle de tensão sobre uma resistência R.

É possível demonstrar que o modelo dinâmico do conversor *buck* é descrito pelo conjunto de EDOs

$$\begin{cases} \dfrac{di_l(t)}{dt} = D(t)\dfrac{v_i}{L} - \dfrac{v_o(t)}{L} \\ \dfrac{dv_o(t)}{dt} = \dfrac{i_l(t)}{C} - \dfrac{v_o(t)}{RC} \,. \end{cases} \tag{1}$$

A derivação desse modelo pode ser vista na apostila da disciplina ou, em maiores detalhes, no livro de Barbi (2015). Tenha em mente que a resistência R:

- caso seja um elemento *passivo*, consumirá energia no circuito e portanto será uma *carga*, com $R > 0$;
- por outro lado, caso seja um elemento *ativo*, injetará energia no circuito e portanto atuará como uma *fonte* tal que, *para fins de modelagem*, considera-se $R < 0$.

Um modelo algébrico bastante simples de uma célula fotovoltaica é apresentado na Fig. 2, em que V é a tensão sobre a célula fotovoltaica e I é a corrente (resultante) que circula por ela. Além disso, I_{pv}, I_d e I_p são as correntes fotovoltaica, do diodo e do resistor *shunt* (paralelo) R_p, respectivamente. Aplicando a lei de Kirchoff dos nós entre a resistência série R_s e os demais componentes obtém-se

$$I_{pv} - I_d - I_p - I = 0 \,. \tag{2}$$

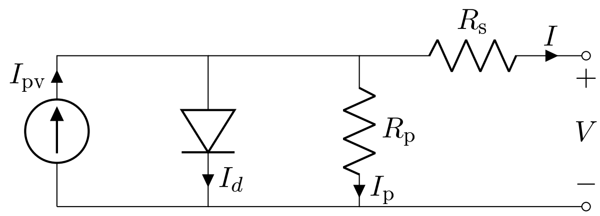

Figura 2: Circuito de uma célula fotovoltaica. Adaptado de Can (2013).

Segundo Can (2013), as correntes nos três elementos em paralelo no modelo da célula fotovoltaica são:

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n}\left[I_{scn} + K_i(T - T_n)\right] \tag{3a}$$

$$I_d = I_s\left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t A}\right) - 1\right] \tag{3b}$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p}\,, \tag{3c}$$

em que G é a irradiação solar, T é a temperatura da célula[1], G_n e T_n são os valores nominais das respectivas grandezas, I_{scn} é a corrente nominal de curto-circuito, e K_i é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito. Note que a expressão de I_p pode ser obtida aplicando a lei de Kirchoff das malhas. No modelo da corrente do diodo, I_s é o seu valor de saturação[2], A é o fator de idealidade do diodo e

$$V_t = \frac{kT}{q} \tag{4}$$

é a tensão térmica, tendo em vista que $q = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C é a carga do elétron e $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann. Um resumo dos parâmetros (já identificados) dos modelos do conversor *buck* e da célula fotovoltaica é apresentado na Tab. 1.

Símbolo	Descrição	Valor
	Conversor *buck*	
R	resistência de carga (sem célula fotovoltaica)	$1\,\Omega$
L	indutância	1 mH
C	capacitância	$800\,\mu$F
v_i	tensão de entrada	1 V
f_s	frequência de chaveamento do sinal PWM	2 kHz
	célula fotovoltaica	
R_p	resistência paralela (*shunt*)	$38{,}17\ \Omega$
R_s	resistência série	$61{,}3\ \text{m}\Omega$
A	fator de idealidade do diodo	1,7538
I_s	corrente de saturação do diodo (valor nominal)	$5{,}68\,\mu$A
I_{scn}	corrente de curto-circuito nominal	3,1656 A
G_n	irradiação solar nominal	$1\,\text{kW/m}^2$
T_n	temperatura nominal da célula fotovoltaica	25°C
K_i	coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	1,8 mA/°C

Tabela 1: Parametrização do sistema fotovoltaico.

Quando a célula fotovoltaica é acoplada ao *buck*, a resistência R representada na Fig. 1 passa a ser a resistência equivalente da célula, determinada como

$$R = \frac{v_o}{i_o} = \frac{V}{-I}\,. \tag{5}$$

[1] que, na prática, varia em função de G.
[2] Na verdade, I_s depende da temperatura T.

Sendo I função de V de acordo com (3), veja que o modelo do sistema formando pelo *buck* e célula fotovoltaica passar a ser variante no tempo, dado que agora temos $R(t)$. Isto representa uma grande dificuldade em termos de controle de tensão sobre a célula fotovoltaica, pois o estudo de estabilidade com base na teoria de sistemas LTI (*linear time-invariant systems*) não mais se aplica.

Ao longo deste experimento consideraremos apenas uma célula fotovoltaica por simplicidade, mas na prática elas são acopladas em série em *painéis fotovoltaicos* para que se obtenha uma tensão significativa do conjunto. Para verificar exemplos comerciais, visite, por exemplo, o *site* da empresa Neosolar (2021).

2 Exercícios

2.1 Trabalho numérico

Célula fotovoltaica

Sabe-se que a potência gerada pela célula fotovoltaica é $P = V\,I$.

1. Determine as curvas $I(V)$ e $P(V)$ para dois cenários.

   (a) Com $G = G_\mathrm{n}$ e os seguintes valores de T: 0°C; 25°C e 60°C.

   (b) Com $T = T_\mathrm{n}$ e os seguintes valores de G: $200\,\mathrm{W/m^2}$; $500\,\mathrm{W/m^2}$ e $1\,\mathrm{kW/m^2}$.

   Observe que (2) é uma equação transcendental em I, ou seja, não é possível encontrar uma solução fechada (analítica) para I. Portanto, vamos lançar mão de um método numérico. Como uma alternativa ao uso da função `fzero()` no Matlab, vamos exercitar o *método do subrelaxamento* (HEGDE, 2018). Primeiro, vamos reescrever (2) como

   $$I = I_\mathrm{pv} - I_\mathrm{d} - I_\mathrm{p}\,. \tag{6}$$

   Definindo $0 < \lambda < 1$ como o fator de relaxamento, o método iterativo aplicado ao problema em questão pode ser representado pelo seguinte pseudo-código:

   while valor absoluto da variação da solução > tolerância **do**
     $I_\mathrm{antigo} = I_\mathrm{novo}$
     I_novo = resultado de (6) utilizando I_antigo (no lado direito).
     $I_\mathrm{novo} = \lambda I_\mathrm{novo} + (1-\lambda) I_\mathrm{antigo}$
     variação da solução = $I_\mathrm{novo} - I_\mathrm{antigo}$
   end while

   Atenção: limite o domínio (valores de V) das funções ao intervalo em que a potência da célula é majoritariamente positiva (ou seja, em que ela gera energia, em vez de consumir).

2. No contexto do item 1, para um ponto (V,I) de sua escolha, com o objetivo de evidenciar a velocidade de convergência do método iterativo de subrelaxamento, apresente sobrepostos dois gráficos de I_novo em função da iteração k, obtidos com valores distintos de λ.

3. Com base em artigos científicos, a exemplo do trabalho de Rustemli e Dincer (2011), tente propor um modelo para a dependência da corrente de saturação I_s do diodo na temperatura T.

Buck com célula fotovoltaica

4. Implemente o modelo do conversor *buck* acoplado à célula. Utilizando condições iniciais favoráveis[3], apresente resultados de malha *aberta* para um degrau $D(t) = 0.3$, ou seja, considerando o modelo médio do *buck*.

[3]Note que $v_o(0) = 0$ pode gerar problemas numéricos.

5. Projete um controlador para $v_o(t) = V(t)$ que atue em $D(t)$. Apresente resultados de malha *fechada* considerando condições favoráveis e uma referência $v_{\text{ref}} = 0.2\,\text{V}$. *Dica:* se necessário, considere uma ação derivativa no controlador para melhorar a estabilidade, mas não se esqueça de verificar a factibilidade da ação de controle.

6. Implemente um algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT) do tipo *perturba-e-observa* (P&O), conforme apresentado, por exemplo, por Nedumgatt et al. (2011). Mostre como o algoritmo funciona por meio de um fluxograma[4]. Para isso defina um passo que julgar razoável na tensão de referência, $v_{\text{ref}}(t)$, a qual será imposta pelo algoritmo P&O ao sistema de controle. Apresente resultados de simulação em um cenário em que o sistema parte de $v_{\text{ref}} = 0$ com variação senoidal (por simplicidade) em $G(t)$ que reflita o comportamento dessa perturbação ao longo do período iluminado de um dia (entre 6h e 18h, por exemplo).

Referências

BARBI, I. *Modelagem de Conversores CC-CC empregando Modelo Médio em Espaço de Estados*. [S.l.]: (edição do autor), 2015. ISBN 978-85-901046-9-8.

CAN, H. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, v. 21, p. 301–308, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3906/elk-1105-29>.

HEGDE, S. *AML702 Applied Computation Methods - Lecture 11 - Iterative Methods - Gauss-Seidel Method - Jacobi Method*. 2018. Indian Institute of Technology, Delhi. Disponível em: <https://web.iitd.ac.in/~hegde/acm/lecture/L11_system_of_eqns_iterative_methods.pdf>.

NEDUMGATT, J. J. et al. Perturb and observe mppt algorithm for solar pv systems-modeling and simulation. In: *2011 Annual IEEE India Conference*. Hyderabad, India: IEEE, 2011. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/INDCON.2011.6139513>.

NEOSOLAR. *Painéis solares fotovoltaicos*. 2021. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar.html>.

RUSTEMLI, S.; DINCER, F. Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in matlab/simulink. *Electronics and Electrical Engineering*, v. 109, n. 3, 2011. ISSN 1392 – 1215. Elektronika ir elektrotechnika. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.109.3.166>.

[4]É possível aproveitar fluxogramas da literatura desde que a fonte seja devidamente citada.