



Projeto de controladores PI multimalhas de um sistema PV monofásico de duplo estágio

Project of multi-loop PI-controllers of a double-stage single-phase PV system

João Augusto Carvalho Neves*, Sérgio Augusto Oliveira da Silva†,
Guilherme Masquetti Pelz‡

RESUMO

Este trabalho aborda o projeto de controladores proporcionais-integrais (PI) multimalhas, destinados ao controle da tensão de saída de um arranjo fotovoltaico (PV) de um sistema PV monofásico de duplo-estágio composto por um estágio CC-CC Boost e um inversor de tensão controlado em corrente. O objetivo do trabalho é projetar adequadamente os ganhos dos controladores do conversor Boost, o qual controla a tensão de saída do arranjo PV, visando diminuir o tempo de resposta do sistema, ao injetar, na rede elétrica, a potência máxima produzida pelo arranjo PV. Para projetar os controladores PI, é utilizada uma estratégia baseada na resposta em frequência. O projeto é desenvolvido com a análise do desempenho do sistema, por simulações computacionais, implementadas no software MATLAB/Simulink. A resposta dinâmica dos controladores obtida com os novos ganhos é comparada com a de projetos apresentados na literatura e obtém-se resultados melhores em termos de menores tempos de resposta no controle da tensão de entrada do conversor Boost quando há mudanças na tensão de referência. Portanto, os controladores PI multimalhas atuando com os ganhos projetados neste trabalho melhoram a resposta dinâmica do sistema por meio do aumento na velocidade de transferência da potência do arranjo PV para a rede elétrica.

Palavras-chave: controladores, fotovoltaico, multimalhas, conversores, solar

ABSTRACT

This study deals with the project of multi-loop PI-controllers for output voltage control of a photovoltaic array employed in a double-stage single-phase PV system composed of a DC-DC Boost stage and a current controlled voltage inverter. The main objective is to project properly the gains of the controllers applied to the Boost converter, which controls the output voltage of the PV module, to reduce the response time of the system when the injection of the maximum power generated by the PV array into the utility grid is considered. For projecting the multi-loop PI-controllers, a strategy based on frequency response is used. The project considers system performance analyses by using computer simulations implemented in MATLAB/Simulink software. Compared to other projects available in the literature, the dynamic response of the control system employing the new proposed gains has better results in faster answer time to control the input voltage of the Boost converter if the reference voltage (maximum power voltage) changes. Therefore, the multi-loop PI controllers implemented using the proposed gains improve the dynamic response of the system by injecting, with higher speed, the available power of PV array into the grid.

Keywords: controllers, photovoltaic, multi-loop, converter, solar

* Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil; joaoneves@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio; augus@utfpr.edu.br

‡ Instituto Federal do Paraná, Assis Chateaubriand, PR, Brasil; guilhermepelz@outlook.com



1 INTRODUÇÃO

Para se utilizar a energia em corrente contínua (CC) produzida por células fotovoltaicas (PV) com a eletricidade da rede de distribuição de energia, que é em corrente alternada (CA), a conexão de duplo-estágio, observada em Silva *et al* (2017), é uma das possíveis estruturas hábeis de injetar essa energia na rede elétrica.

Os conversores para conexão de sistemas PV à rede elétrica de duplo-estágio são formados por um estágio de conversão CC-CA, o qual é responsável pela injeção da energia gerada na rede elétrica, e por um conversor CC-CC, o qual é responsável por adequar a tensão CC de saída do módulo fotovoltaico ao nível do barramento CC do conversor CC-CA. Para o conversor CC-CC Boost funcionar de acordo com o desejado, há a possibilidade de usar controladores Proporcional-Integrais (PI) em estrutura multimalhas, que atuam na razão cíclica do conversor Boost para controlar tensão e corrente disponibilizadas pelo arranjo PV.

Em Silva *et al* (2017), o conversor Boost da conexão de duplo-estágio mencionada é controlado por PI multimalhas. E, ao se analisar a tensão de entrada desse conversor, fornecida pelo módulo fotovoltaico, percebe-se que a resposta dinâmica das malhas de controle atuantes no conversor é consideravelmente demorada quando a tensão de referência (de máxima potência do PV) se altera. Contudo, em Pelz (2018), é descrito “o desenvolvimento de procedimentos metodológicos para o projeto dos controladores [...] PI multimalhas utilizados no controle de tensão do arranjo PV” (PELZ, 2018, p. 20), em que

duas malhas de controle são empregadas. A primeira, chamada de malha interna de controle de corrente, controla a corrente no indutor do conversor Boost, a qual é considerada igual a corrente do sistema PV (i_{pv}). A segunda, chamada de malha externa de controle de tensão, controla a tensão do arranjo PV (SILVA *et al*, 2017, p. 186, tradução nossa).

Destarte, vê-se oportunidades de melhorias: É possível projetar novos ganhos de controle para os controladores PI multimalhas do conversor Boost, que diminuam o tempo da resposta dinâmica do próprio conversor e, por consequência, melhorem o comportamento dinâmico do sistema?

O objetivo deste trabalho é, portanto, projetar adequadamente os ganhos dos controladores PI multimalhas para o conversor CC-CC Boost do sistema PV mencionado, de modo a aumentar a velocidade com que a máxima potência produzida no módulo fotovoltaico é injetada na rede elétrica.

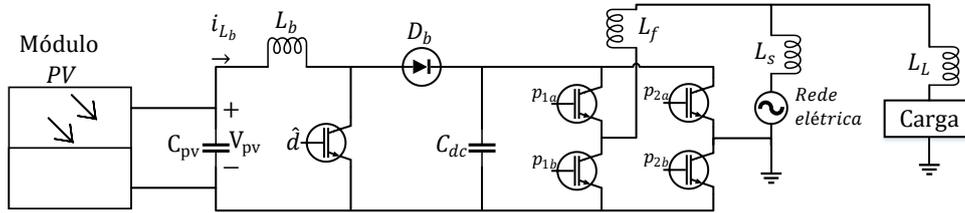
2 MÉTODOS

Após um período inicial de estudo bibliográfico com a leitura de artigos/dissertações sobre o assunto, fez-se a implementação do sistema analisado através do *software* de simulação MATLAB/*Simulink*. Para auxiliar na compreensão dos métodos utilizados e de como conduziram ao objetivo deste documento, os mesmos são apresentados divididos na seguinte sequência: Sistema PV Implementado; e Malha de Controle do Conversor CC-CC Boost.

2.1 Sistema PV Implementado

Como base desse estudo, houve a implementação do sistema fotovoltaico de duplo-estágio discutido em Silva *et al* (2017), que está apresentado na Fig. 1.

Figura 1 – Esquema do sistema PV monofásico



Fonte: Autoria própria (2021)

O sistema faz uso de algumas estruturas auxiliares, que não estão indicadas na Fig. 1: Rastreador do Máximo Ponto de Potência (MPPT), *Phase-Locked Loop* (PLL), Algoritmo de Compensação com Referência Síncrona (SRF), Malha de Controle *Feed-Forward* (FFCL). Estas estruturas estão detalhadas no artigo de Silva *et al* (2017). Aqui serão abordados apenas os controladores PI do conversor Boost.

2.2 Malha de Controle do Conversor CC-CC Boost

A modelagem do conversor Boost foi realizada com base na modelagem feita por Pelz (2018), encontrando as funções de transferência (FT) que relacionam (i) a corrente i_{L_b} com a razão cíclica do conversor, (ii) a tensão no arranjo PV com a corrente i_{L_b} . As FT estão representadas, respectivamente, pelas Eqs. (1) e (2) a seguir.

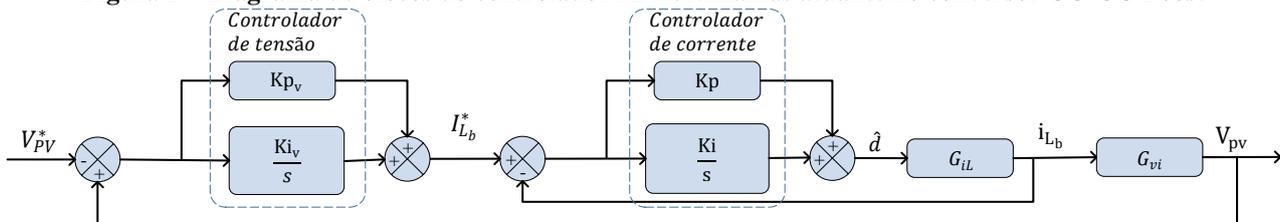
$$G_{iL}(s) = \frac{\hat{i}_{L_b}}{\hat{d}} = \frac{V_{dc} * (C_{PV} * R_{PV} * s + 1)}{C_{PV} * R_{PV} * L_b * s^2 + (C_{PV} * R_{L_b} * R_{PV} + L_b) * s + R_{L_b} + R_{PV}} \quad (1)$$

$$G_{vi}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}}{\hat{i}_{L_b}} = -\frac{R_{PV}}{C_{PV} * R_{PV} * s + 1} \quad (2)$$

Nas equações, observa-se as variáveis: V_{dc} – Tensão no barramento CC; C_{pv} – Capacitância na saída do módulo PV; L_b – Indutância do indutor no conversor Boost; R_{L_b} – Resistência interna do indutor L_b ; \hat{d} – razão cíclica do conversor Boost; \hat{v}_{PV} – tensão no arranjo PV; \hat{i}_{L_b} – corrente no L_b ; e R_{PV} – resistência que modela o arranjo PV segundo o circuito equivalente apresentado por Femia *et al* (2009).

Com a Figura 2, entende-se como os controladores atuam no comando da chave \hat{d} do conversor para controlar a tensão de saída do módulo PV.

Figura 2 – Diagrama de blocos do controlador PI multimalhas atuante no conversor CC-CC Boost



Fonte: Autoria própria (2021)

Para encontrar os ganhos adequados, empregou-se o método de projeto de controlador PI baseado na resposta em frequência, descrito em Angélico *et al* (2014), combinando-o com os passos da estruturação multimalhas utilizados por Pelz (2018). Considerando que o tempo da resposta do controle é influenciado pela frequência de corte (f_c) e margem de fase (MF) especificadas, destaca-se: os controladores tiveram os ganhos projetados com f_c mais alta em relação aos originais, de modo a se obter um controle mais rápido, porém sem tornar o sistema instável; e os controladores de corrente tiveram f_c maior que a dos de tensão, logo, cada ciclo de controle da malha externa só pode ocorrer após alguns ciclos de controle da malha interna.

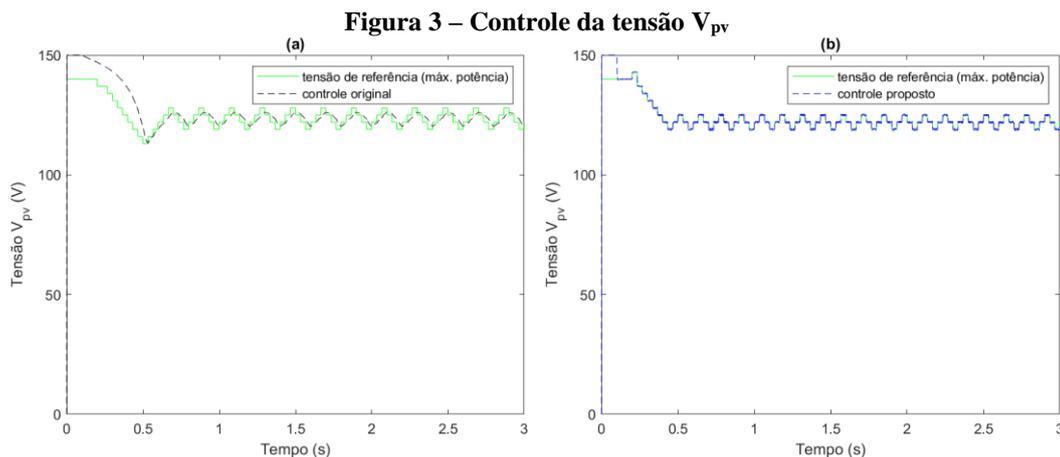
Destarte, o controlador da malha interna de corrente foi o primeiro a ter os ganhos projetados. Escolheu-se a MF desejada e, na resposta em frequência da Eq. (1), identificou-se a f_c mínima, onde a fase do sistema é

$$\phi = -180^\circ + 90^\circ + MF \quad (3)$$

Assim, definiu-se a f_c desejada e os ganhos do controlador foram calculados. O modo de calculá-los é visto em Angélico *et al* (2014). Na sequência, foi multiplicado o negativo da Eq. (2) com a FT de malha fechada da malha interna controlada, dando origem a FT de malha aberta da malha de tensão, e os ganhos de controle foram obtidos estabelecendo a MF desejada, identificando a f_c mínima e, para esse caso, a f_c máxima. A f_c desejada foi selecionada no intervalo de frequências entre a máxima e a mínima. A performance da malha de controle foi analisada no MATLAB/Simulink conforme a V_{PV}^* do sistema se modificava.

3 RESULTADOS

O sistema da Fig. 1 foi reproduzido no *software* de simulação para que se obtivesse o desempenho do PI multimalhas adotado no artigo de Silva *et al* (2017). Na Fig. 3(a), tem-se o desempenho desse controlador sobre a tensão de entrada do conversor CC-CC Boost (V_{PV}), em 25 °C e 1000 W/m² de irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 3(a) evidencia o atraso da tensão V_{PV} controlada em acompanhar V_{PV}^* , conforme esta última busca o ponto de máxima potência de operação. Através dos métodos mencionados na seção anterior, realizou-se a projeção da mesma estrutura de controladores, porém com novos ganhos de controle capazes de tornar mais rápida a resposta dinâmica da tensão V_{PV} . As especificações do projeto encontram-se na Tab. 1.

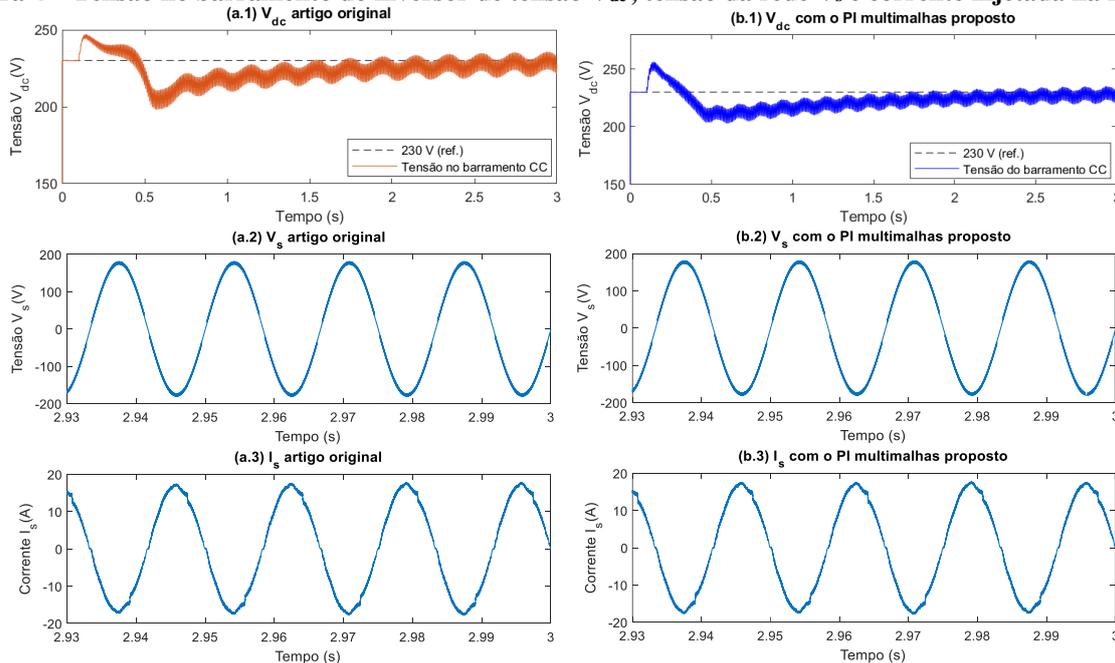
Tabela 1 – Especificações de projeto proposto

Nome	Especificação
MF_i	$89,9^\circ$
fc_i	1800 Hz
Kp_i	0,07052
Ki_i	14,7903
MF_v	80°
fc_v	400 Hz
Kp_v	0,3023
Ki_v	442,8982

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 3(b) mostra a simulação do controle da tensão V_{PV} quando os ganhos (Kp_i , Ki_i , Kp_v , Ki_v) do PI multimalhas propostos na Tab. 1 são adotados. Assim, observa-se que a resposta do controle de V_{PV} é feita em um menor intervalo de tempo, onde V_{PV} consegue reagir e acompanhar V_{PV}^* nos momentos em que esta é incrementada/decrementada pelo MPPT. A figura ainda mostra os sinais coincidindo praticamente o tempo todo após o período de inicialização (0,2 s).

Figura 4 – Tensão no barramento do inversor de tensão V_{dc} , tensão da rede V_s e corrente injetada na rede I_s



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 4 apresenta o comparativo entre o desempenho do sistema usando os controladores com os ganhos originais e com os ganhos propostos, em relação a tensão V_{dc} no barramento CC, a tensão V_s e a corrente I_s da rede. Em 4(a.2) e 4(b.2), observa-se a permanência de V_s em $127 V_{rms}$ para ambos os casos. Em 4(a.3) e 4(b.3), os quatro ciclos de onda em regime permanente apresentam formas e valores similares para I_s , indicando que o sistema continua funcionando.



Em 4(b.1), nota-se a maior frequência com que V_{dc} é corrigida/alimentada pela potência do módulo PV para se ajustar aos 230 Volts (V) de referência se comparada com 4(a.1), além de possuir menor amplitude de oscilação do valor da tensão.

4 CONCLUSÃO

Este estudo permitiu projetar ganhos adequados para os controladores PI multimalhas do conversor CC-CC Boost empregado em um sistema fotovoltaico monofásico de duplo-estágio. A análise da resposta em frequência das FT do sistema, associada com as restrições de escolha das frequências de corte para que ambas as malhas funcionassem sintonizadas, permitiram uma definição coerente das especificações de projeto.

A partir dos ganhos projetados com a metodologia adotada neste trabalho, foi possível reduzir o tempo de resposta associada à variável controlada (V_{PV}). Adicionalmente, as amplitudes das oscilações da tensão do barramento do inversor (V_{dc}) foram também reduzidas. Sendo assim, permite-se concluir que o sistema adquiriu maior estabilidade ao atuar no ponto de máxima potência, bem como na injeção de corrente na rede elétrica pelo inversor. Portanto, a dinâmica associada à injeção da energia gerada pelo módulo PV na rede elétrica foi otimizada e o conversor Boost pôde operar com mais confiabilidade na extração da máxima potência do arranjo PV, dadas as variações da irradiância solar e temperatura.

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se que a metodologia utilizada neste trabalho seja adotada com a finalidade de projetar ganhos adequados para controladores PI multimalhas de um sistema PV monofásico de duplo-estágio.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos desta pesquisa são direcionados ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANGÉLICO, Bruno A.; CAMPANHOL, Leonardo B.G.; SILVA, Sérgio A. O. **Proportional-integral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram**. IET Power Electronics, v.7, n.10, p. 2647-2659, 2014.
- FEMIA, Nicola et al. **A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 11, p. 4473-4482, 2009.
- PELZ, Guilherme M. **Sistema de geração distribuída fotovoltaico integrado a um condicionador de qualidade de energia unificado monofásico-trifásico aplicado à áreas rurais ou remotas**. 180 f. Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica, UTFPR. Cornélio Procópio, 2018.
- SILVA, Sérgio A. O. et al. **Feed-forward DC-bus control loop applied to a single-phase grid-connected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning**. IET Renewable Power Generation, v. 11, n.1, p. 183-193, 2017.