

CONTROLE DE INVERSOR MONOFÁSICO EM EIXOS SÍNCRONOS PARA CONEXÃO À REDEMarcos V. A. Vedovatte¹, Moacyr A. G. Brito²

1. Estudante do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFMS (PPGEE-UFMS)

2. Professor da FAENG-UFMS – Departamento de Engenharia Elétrica/Orientador

Resumo

Esse artigo apresenta o projeto de um inversor monofásico em ponte completa conectado à rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, controlado no sistema de eixos síncronos - dq , para a injeção de potência ativa. São apresentados resultados de simulações quanto ao comportamento das formas de onda características para a aplicação utilizando o *software* Matlab/Simulink® observando-se desempenho superior à estratégia de controle convencional nos eixos abc.

Palavras-chave: controladores; sistema dq ; potência ativa.

Introdução

A utilização de novas fontes de energia, principalmente as renováveis, para a geração distribuída tem sido cada vez mais comuns, destacando-se, neste cenário, a energia solar fotovoltaica. No entanto, a energia proveniente da fonte solar fotovoltaica apresenta níveis de tensão e corrente reduzidos e com formas de onda contínuas - CC, enquanto que as redes de distribuição operam em corrente alternada - CA. Desta forma, os conversores eletrônicos de potência são obrigatórios para adequar a energia para o uso, destacando-se o uso dos conversores CC-CC e dos conversores CC-CA, estes últimos, conhecidos como inversores de tensão.

Os inversores são circuitos que convertem a energia em corrente contínua para corrente alternada, sendo que o inversor monofásico, em ponte completa, é amplamente utilizado devido as suas vantagens e características inerentes (AHMED, 2000; HART, 2012), tais como facilidade de implementação e robustez.

Para que os inversores funcionem adequadamente, sistemas de controle são mandatórios e diferentes metodologias de controle podem ser aplicadas. Uma metodologia de projeto não usual utilizando o sistema em eixos síncronos - referência dq torna-se atrativa para pesquisas e desenvolvimentos uma vez que esta técnica elimina o erro em regime permanente, mesmo para sistemas alternados, utilizando controladores que são utilizados para sistemas com referências contínuas. Em (BAIMEL, BELIKOV, *et al.*, 2017), (GUIZELINI, 2017) e (MONFARED, GOLESTAN e GUERRERO, 2014) foram utilizadas a técnica de referência síncrona para o controle de cargas locais e mitigação de correntes harmônicas.

Neste sentido, este trabalho tem como proposta projetar um sistema de controle em eixos síncronos para a injeção de potência ativa na rede de distribuição de energia elétrica controlando as variáveis i_d e i_q do inversor com o intuito de obter comportamento superior à metodologia convencional nos eixos abc.

Metodologia

Adotou-se como topologia conversora o inversor VSI *full-bridge*, operando com modulação unipolar e conectado à rede através de um filtro indutivo. A Figura 1 apresenta o circuito de potência do inversor monofásico em conectividade à rede de distribuição. A fonte de energia é provida por um conjunto de painéis solares fotovoltaicos que operam no MPPT devido à um algoritmo de tensão constante (BRITO *et al.*, 2013).

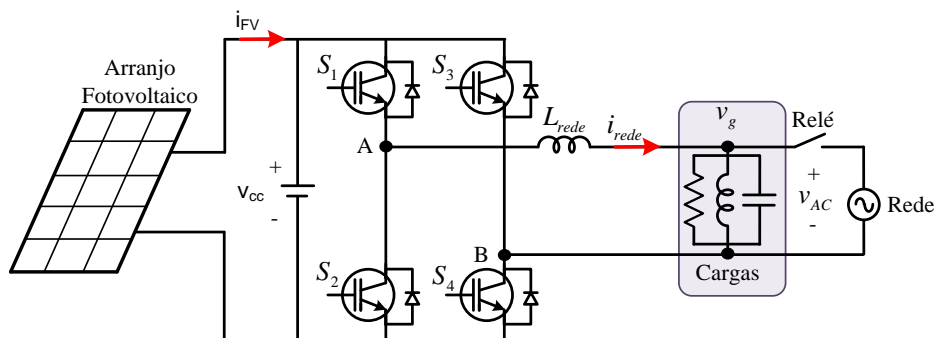


Figura 1: Circuito equivalente de um inversor monofásico full bridge em conexão à rede.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros do circuito de potência do inversor. A equação (1) apresenta a obtenção do índice de modulação m , enquanto a equação (2) apresenta o cálculo da corrente de pico $I_{L_{rede}}$.

Tabela 1: Valores dos parâmetros para o projeto do inversor.

Tensão de Entrada V_{CC} (V)	Tensão de Pico $V_{redepico}$ (V)	Potência P_{ca} injetada na rede (W)	Frequência de Chaveamento f_c (kHz)	Ripple de corrente (A)
220	180	400	30	10 %

$$m = \frac{V_{redepico}}{V_{CC}} \quad (1)$$

$$I_{Lrede} = \frac{2 \cdot P_{ca}}{V_{redepico}} \quad (2)$$

Nas condições de projeto, a razão cíclica m é igual à 0,82 e a corrente de pico injetada na rede i_{Lrede} é igual à 4,45 A, que em 127 V_{RMS} provê 400 W de potência ativa. A indutância de conexão é obtida conforme (5) baseando-se na tensão instantânea aplicada à indutância de rede quando a tensão da rede passa por seu valor máximo instantâneo ($V_{redepico}$).

$$v_{Lrede} = L_{rede} \cdot \frac{di_{Lrede}}{dt} \quad (3)$$

$$(V_{CC} - V_{redepico}) = L_{rede} \cdot \frac{\Delta i_{Lrede}}{\Delta t} \quad (4)$$

$$L_{rede} = \frac{(V_{CC} - V_{redepico}) \cdot \Delta t}{\Delta i_{Lrede}} \quad (5)$$

Considerando Δt o tempo em que as chaves permanecem em condução na primeira etapa de operação (S_1 e S_4 ligadas) e que o período é o inverso da frequência de chaveamento, tem-se:

$$L_{rede} = \frac{(V_{CC} - V_{redepico}) \cdot m \cdot T}{\Delta i_{Lrede}} \quad (6)$$

$$L_{rede} = \frac{(V_{CC} - V_{redepico}) \cdot m}{\Delta i_{Lrede} \cdot f_c} \quad (7)$$

Conforme (7) e os dados da Tabela I, obtém-se uma indutância de conexão L_{rede} igual à 2,45 mH.

A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos para o controle do sistema utilizando o referencial dq - eixos síncronos, assim como a equação (8) apresenta o grupo de equações de entrada do sistema. Observa-se, neste ponto, a necessidade de criar uma corrente fictícia defasada de 90 graus da corrente real, denominada de i_β . Observando-se este diagrama, ao se controlar a variável Ref_Id é possível alterar o valor da potência ativa injetada; I_{q_ref} é ajustada para zero a fim de não haver injeção de reativo.

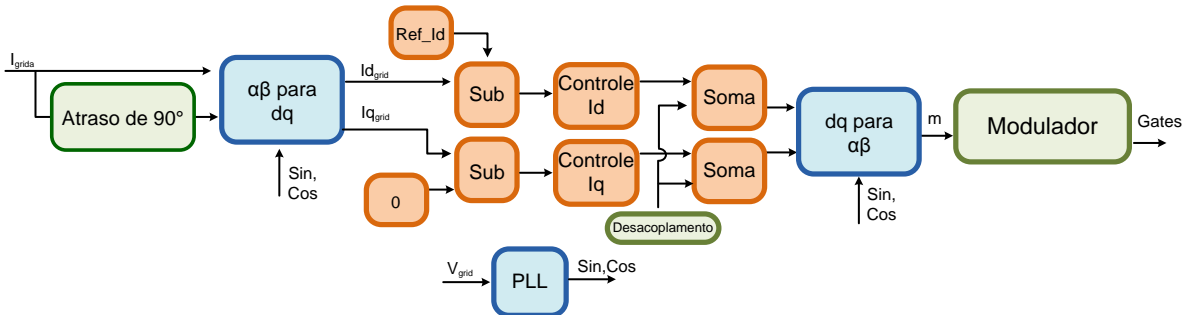


Figura 2: Diagrama de blocos para o controle do sistema em eixos síncronos.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Lrede}(\omega \cdot t) \\ i_{Lrede}(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em (MONFARED, GOLESTAN e GUERRERO, 2014) são propostas técnicas para a geração da corrente i_β . Analisando-se as técnicas apresentadas, a utilização de um filtro passa tudo de primeira ordem apresentou o melhor desempenho. A equação (9) apresenta esta função de transferência, onde ω_o é igual a 377 rad/s.

$$\frac{i_\beta}{i_\alpha} = \frac{-s + \omega_o}{s + \omega_o} \quad (9)$$

A planta de controle das correntes i_d e i_q , após transformação para o sistema dq e aplicado desacoplamento, é obtida conforme (10).

$$\frac{id, q(s)}{m(s)} = \frac{V_{cc}}{sL_{rede} + r_{Lrede}} \quad (10)$$

Resultados e Discussão

O sistema inversor foi simulado no *software* Matlab/Simulink® adotando-se controladores PI com diferentes frequências de cruzamento de ganho (variando-se de 600 Hz até 6 kHz). O projeto foi baseado nos diagramas de Bode de módulo e de fase, via equação (10). Nas Figuras 3-a e 3-b apresentam-se os diagramas de Bode do sistema compensado adotando-se uma frequência de cruzamento de ganho de 3,3 kHz. As Figuras 4-a, 4-b e 4-c apresentam, respectivamente, as correntes i_α e i_β com utilização do filtro passa tudo, a corrente de eixo direto e a corrente do eixo de quadratura do sistema analisado, salientando que o controlador PI da Figura 3 teve o zero alocado em -200, tendo, desta forma, as constantes $k_p = 0,2311$ e $k_i = 46,22$. Na Figura 5-a é possível observar a injeção de potência ativa e na Figura 5-b a injeção de potência reativa na rede. Observa-se, finalmente, a corrente da rede (I_{rede}) na Figura 6, perfeitamente senoidal e em fase com a referência. Esta possui DHT de 2,6 %, muito menor do que 5% exigidos por normas (ABNT NBR, 2012).

Observando-se os resultados apresentados, nota-se que, para a frequência de cruzamento de ganho igual a 3,3 kHz, o sistema não apresentou *overshoot*, teve DHT extremamente reduzida e o menor tempo de assentamento dentre os controladores analisados (variando-se as frequências). A Tabela 2 apresenta o resumo dos índices de mérito obtidos para as 5 frequências distintas, chamando a atenção para a distorção harmônica da corrente de rede, sempre menor do que 2,7%.

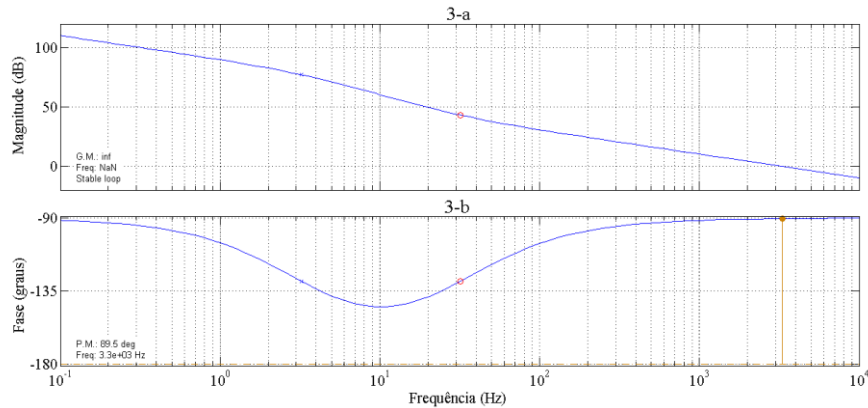


Figura 3: Diagrama de Bode para o controle de corrente no sistema de eixos síncronos, onde a) ganho e b) fase do sistema.

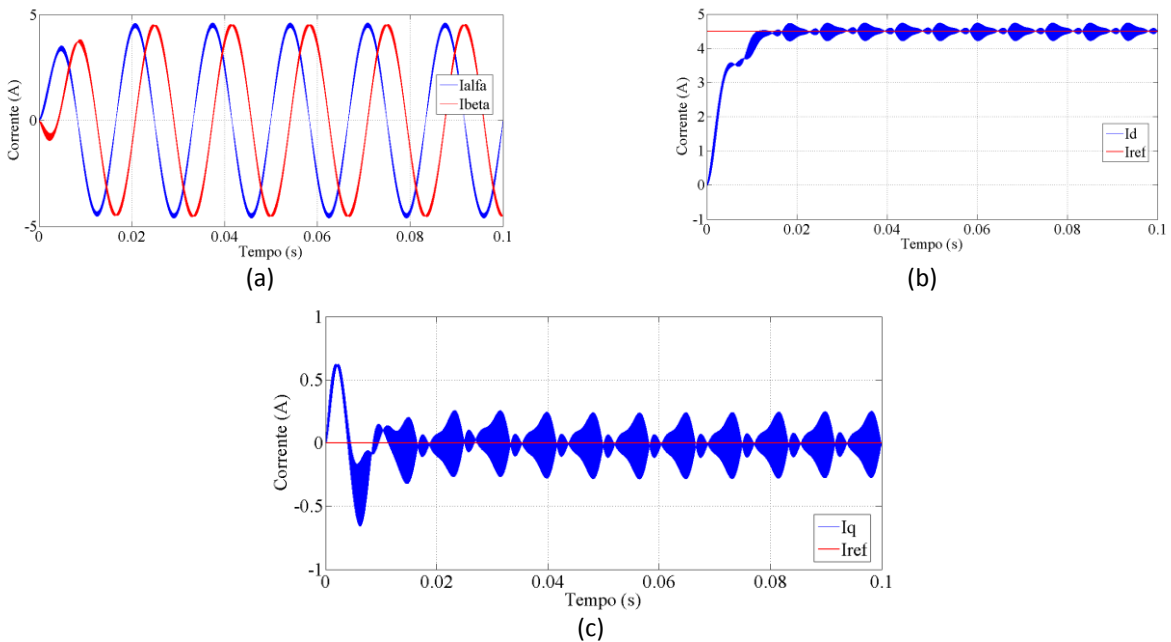


Figura 4: Formas de onda correspondentes: a) à corrente i_α e à corrente i_β , b) à corrente do eixo direto e c) à corrente do eixo de quadratura.

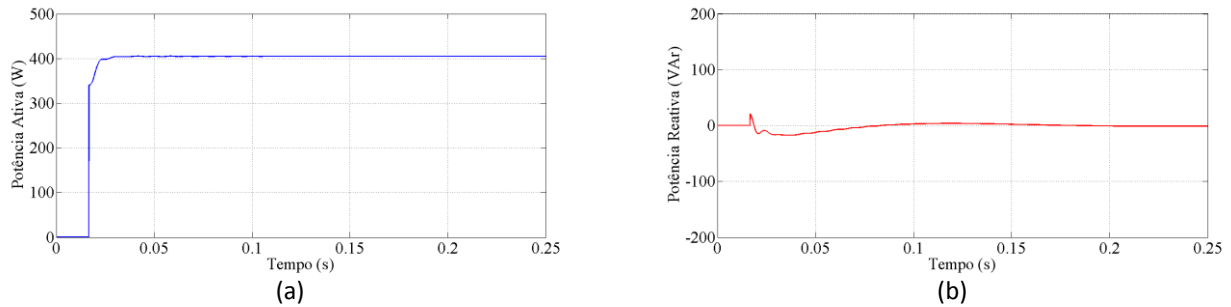


Figura 5: Comportamento das potências a) ativa e b) reativa.

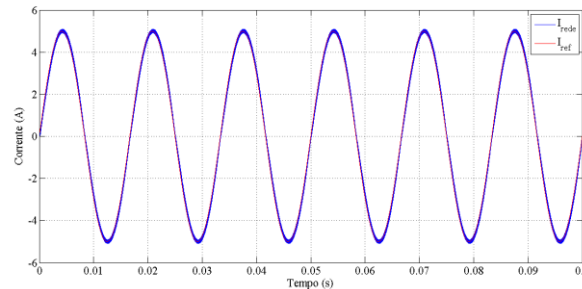


Figura 3: Forma de onda de corrente injetada na rede juntamente com a referência.

Tabela 2: Resumo dos valores obtidos para diferentes frequências de cruzamento de ganho para o sistema de controle em eixos síncronos.

Frequência de Cruzamento de Ganho (kHz)	Coefficiente k_p	Coefficiente k_i	Taxa de Distorção Harmônica - DHT	Tempo de Assentamento (ms)
6,000	0,4210	84,20	2,63 %	45
4,650	0,3260	65,20	2,63 %	36
3,300	0,2311	46,22	2,63 %	30
1,950	0,1370	27,40	2,64 %	35
0,600	0,0420	8,40	2,70 %	53

Conclusões

Apresentou-se uma proposta de controle para um inversor monofásico em eixos síncronos para a injeção de potência ativa na rede. Em comparação com o controlador convencional no sistema abc , o controlador no sistema de eixos síncronos dq apresentou uma menor taxa de distorção harmônica, sendo que o pior caso atingiu 2,7%, enquanto que para o controlador no sistema convencional a taxa chega à aproximadamente 4,5%. Baseado nos resultados apresentados nota-se que o controle de inversores monofásicos no sistema de eixos síncronos é uma alternativa de excelente desempenho, sem a necessidade do uso de controladores ressonantes.

Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16149: Sistemas Fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, 2013, p. 12.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

BAIMEL, D. et al. Dynamic Modeling of Networks, Microgrids, and Renewable Sources in the dq0 Reference Frame: A Survey. **IEEE Access**, v. 5, p. 21323-21335, Outubro 2017.

BRITO, M. A. G. et al. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 3, p. 1156–1167, 2013.

GUIZELINI, I. R. **Desenvolvimento de Um Sistema de Geração Distribuída Conectado à Rede Elétrica Monofásica Utilizando Filtros L e LCL**. Cornélio Procópio: UTFPR, 2017.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

MONFARED, M.; GOLESTAN, S.; GUERRERO, J. M. Analysis, Design, and Experimental Verification of a Synchronous Reference Frame Voltage Control for Single-Phase Inverters. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 61, n. 1, p. 258-269, Janeiro 2014.