DOI: 10.48011/asba.v2i1.1288

Desenvolvimento e análise de um algoritmo *backstepping* aplicado a um conversor estático com conexão à rede

Marcelo Back de Araujo * **Rodrigo Padilha Vieira** *

* *Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, RS (e-mails: marceloback775@gmail.com, rodrigovie@gmail.com)*

Abstract: This papers presents the analysis and development of a backstepping controller applied to current control of grid-tied converters. A gain design methodology for the proposed backstepping algorithm is presented and an analysis of the impact of the parameter changes is carried out. Therefore, the system design is performed in a simple way, where the selected gains are associated with the required dynamic. Simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the current control method.

Resumo: Esse artigo apresenta o desenvolvimento e análise de um algoritmo *backstepping* aplicado ao controle de corrente de um conversor estático conectado à rede. A análise do sistema proposto é realizada com apresentação de uma metodologia de projeto de ganhos do controlador e verificação do impacto das variações paramétricas. Assim, o projeto do sistema é realizado de uma forma simples, em que a escolha de ganhos é associada à dinâmica requerida. Resultados de simulações são apresentados para validar o método proposto.

Keywords: backstepping; grid-tied converter; proportional integral controller; Lyapunov-based techniques.

Palavras-chaves: backstepping; conversores conectados à rede; controlador proporcional integral; técnicas Lyapunov.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da inserção de fontes de energia renováveis, conversores estáticos do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*) têm sido amplamente utilizados para a interconexão entre tais fontes e a rede elétrica Wu et al. (2014). Para assegurar que tais conversores operem em faixas adequadas em termos de rejeição de harmônicas e distúrbios da tensão no ponto de conexão, normas regulamentadoras devem ser atendidas, como a IEEE Std 1547-2018. Neste contexto, o uso de filtros passivos do tipo L ou LCL entre o VSI e a rede é bem consolidado na indústria e academia com o intuito de atenuar as harmônicas de corrente devido ao chaveamento do VSI. Para rejeição de harmônicas de baixa ordem, em geral, são utilizados controladores de corrente com propriedades de rejeição destas harmônicas. Nestas aplicações, diversas técnicas de controle são discutidas na literatura, nas quais se destacam o uso do controlador proporcional ressonante Busada et al. (2018) e o controlador proporcional integral em eixos síncronos Dannehl et al. (2009), por seus projetos serem amplamente conhecidos e facilmente implementados.

O problema do controle de corrente em conversores estáticos conectados a rede vem sendo tratado por diferentes formas, principalmente quando se utiliza um filtro de saída do tipo LCL, no qual o pico de ressonância, característica intrínseca do filtro, leva a maior complexidade na obtenção de um controlador que garanta estabilidade do sistema.

Como consequência, na literatura são apresentadas diversas técnicas que possibilitam operação satisfatória nesse sistema Guo et al. (2019). Por exemplo, as técnicas *model predictive controller*, *sliding mode controller* e *backstepping* são adotadas para incrementar a robustez e lidar com o problema associado ao pico de ressonância Falkowski e Sikorski (2018); Martins et al. (2019); Dehkordi et al. (2017).

O algoritmo *backstepping*, inicialmente descrito em Kokotovic (1992), é um dos métodos de controle não linear mais conhecidos e implementados. Este método de controle utiliza funções Lyapunov, sendo que é possível dividir um sistema em diversos subsistemas, usufruindo das chamadas variáveis virtuais de controle, o que torna o projeto deste algoritmo um passo a passo Swaroop et al. (2000). A técnica *backstepping* pode ser aplicada em sistemas não lineares, onde as não linearidades podem acabar se tornando úteis para estabilização das funções Lyapunov. Além disso, a estabilização das funções Lyapunov podem ser realizadas através de uma vasta gama de leis de controle, possibilitando que o algoritmo *backstepping* possa ser escolhido de maneira a compensar incertezas que comprometem a robustez do sistema Mazenc e Bliman (2006). No entanto o projeto do *backstepping* em sistemas muito complexos pode demandar grande esforço matemático para a estabilização de cada subsistema Kwan e Lewis (2000). Também,

⋆ Reconhecimento do suporte financeiro deve vir nesta nota de rodapé.

o algoritmo exige a diferenciação da variável a ser estabilizada, levando inevitavelmente a operação da derivada da referência, o que é uma operação não-causal, obrigando o projetista a fazer aproximações matemáticas Swaroop et al. (2000). A técnica *backstepping* tem sido aplicada em diversas áreas do conhecimento, tendo destaque em robótica, aeroespacial, eletrônica de potência e máquinas elétricas Zuo e Mallikarjunan (2017); Nikdel et al. (2016); Yin et al. (2019); Wu e Lu (2019).

Em Yin et al. (2019) a técnica *backstepping* é aplicada em um conversor conectado à rede com filtro LCL, em que é apresentado uma comparação com o compensador proporcional ressonante, é demonstrando que o algoritmo *backstepping* tem um melhor desempenho, boa compensação de distorção da rede e robustez frente a variações de impedância. Um controle de velocidade de uma máquina de ímãs permanentes é feito através do algoritmo *backstepping* em Wu e Lu (2019), o algoritmo é projetado em conjunto com a técnica de modos deslizantes, o que garante maior robustez e grande eficácia no rastreamento de velocidade.

Neste trabalho, a dinâmica do algoritmo *backstepping* é analisada em um conversor conectado à rede através de um filtro L, tendo em vista que são raras metodologias de projeto de ganhos para esta técnica. Desta forma, as principais características deste trabalho são: *i)* desenvolvimento de um algoritmo *backstepping* para controle de corrente de um conversor conectado à rede, *ii)* análise do impacto dos ganhos na dinâmica do algoritmo e *iii)* análise de robustez frente a incertezas paramétricas. Por fim, resultados de simulações são apresentados para a validação da teoria abordada.

2. ALGORITMO BACKSTEPPING APLICADO AO CONVERSOR TRIFÁSICO CONECTADO À REDE

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento do algoritmo *backstepping* aplicado ao conversor trifásico conectado à rede através de um filtro L, conforme Figura 1.

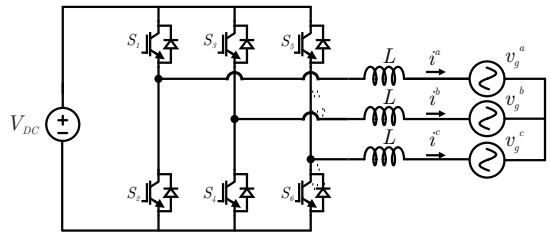

Figura 1. Inversor de 3 braços conectado à rede através do filtro L.

Utilizando a transformada de Clarke no circuito da Figura 1, é possível obter dois circuitos desacoplados nos eixos $\alpha\beta$, Remus Teodorescu (2011). Deste modo, um único circuito pode ser adotado para o desenvolvimento do algoritmo *backstepping*, possibilitando que a técnica possa ser replicada nos dois eixos estacionários. Na Figura 2, é ilustrado o circuito utilizado para o desenvolvimento do algoritmo, em que uma equação que descreve sua dinâmica é dada por

$$\dot{i} = \frac{u}{L} - \frac{v_g}{L} \tag{1}$$

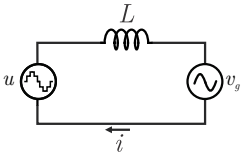

Figura 2. Circuito simplificado adotado para o desenvolvimento do algoritmo *backstepping*.

A técnica *backstepping* pode ser empregada para rastreamento de uma dada referência de corrente. O método é baseado em buscar a establização do sistema através de funções Lyapunov. Assim, o erro de referência é definido como:

$$e = i^* - i \tag{2}$$

em que i é a corrente de saída do conversor e i^* é a referência de corrente desejada.

Passo 1 - Definir a variável a ser estabilizada.

Neste trabalho, a variável escolhida é a integral do erro de corrente, tendo em vista que a integração amplifica erros de baixas frequências, o que a torna útil em vários tipos de aplicação. Por isso, um modelo aumentado incluindo a integral do erro se torna vantajoso para rastreamento da referência.

$$\xi = \int_0^t e dt \tag{3}$$

Uma candidata a função Lyapunov é escolhida como

$$V_1 = \frac{\xi^2}{2}. \tag{4}$$

Portanto, a derivada da função pode ser escrita como

$$\dot{V}_1 = \xi e \tag{5}$$

Com o objetivo de se garantir que a derivada da função candidata Lyapunov seja negativa, a equação (5) é reescrita da forma,

$$\dot{V}_1 = \xi(e + c_1\xi) - c_1\xi^2 \tag{6}$$

em que c_1 é uma constante positiva.

Passo 2 - Para garantir a estabilização da função candidata, a variável virtual é escolhida como

$$z = e + c_1\xi \tag{7}$$

Com isso, tem-se

$$\dot{\xi} = z - c_1\xi \tag{8}$$

Então, uma possível candidata a função Lyapunov é

$$V_2 = \frac{\xi^2}{2} + \frac{z^2}{2} \tag{9}$$

Caso se garanta a estabilidade desta função, pelo teorema de Lyapunov, a variável de interesse tenderá a rastrear a referência proposta.

Derivando a função candidata, tem-se

$$\dot{V}_2 = \xi e + z\dot{z}. \tag{10}$$

Consequentemente, a derivada pode ser escrita como

$$\dot{V}_2 = \xi(z - c_1\xi) + z\Big(\dot{i}^* - \frac{u}{L} + \frac{v_g}{L} + c_1 e\Big) \tag{11}$$

Rearranjando os termos, tem-se

$$\dot{V}_2 = -c_1\xi^2 + z\Big(\xi + \dot{i}^* - \frac{u}{L} + \frac{v_g}{L} + c_1 e\Big) \tag{12}$$

Portanto, para a estabilização do sistema proposto, a ação de controle u pode ser escolhida como

$$u = L\big(c_2 z + \xi + \dot{i}^* + c_1 e\big) + v_g \tag{13}$$

em que c_2 é uma constante positiva.

Desta forma, a derivada da função candidata se torna negativa, garantindo a estabilidade do sistema, conforme (14).

$$\dot{V}_2 = -c_1\xi^2 - c_2 z^2 \tag{14}$$

O sinal de controle pode ser reescrito como

$$u = L\Big((c_1 + c_2)e + (c_1c_2 + 1)\int_0^t e dt + \omega i + \dot{i}^*\Big) + v_g \tag{15}$$

Em suma, caso utilizado a ação de controle dada em (15), quaisquer constantes positivas podem ser utilizadas nos ganhos c_1 e c_2 para estabilizar o sistema.

2.1 Análise dinâmica da técnica backstepping

O algoritmo *backstepping* é desenvolvido por funções Lyapunov, que, embora garantam estabilidade, não fornecem informações relevantes sobre a dinâmica do sistema.

Para isso, a equação (15) é inserida no modelo matemático do sistema (1). Desta forma, a inserção do sinal de controle no modelo matemático resulta em

$$L\dot{i} = L\Big((c_1 + c_2)e + (c_1c_2 + 1)\int_0^t e dt\Big) + L\dot{i}^* \tag{16}$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação acima, tem-se

$$i\Big(s + (c_1 + c_2) + \frac{c_1c_2 + 1}{s}\Big) = i^*\Big(s + (c_1 + c_2) + \frac{c_1c_2 + 1}{s}\Big). \tag{17}$$

Por consequência, pode-se observar que, teoricamente, o algoritmo *backstepping* cancela os polos com os zeros do modelo, tornando a resposta do sistema exatamente a mesma que a referência imposta.

No entanto, em sistemas práticos, o sinal de referência da corrente é obtido a partir de medidas no ponto de conexão a rede, o que impossibilita a obtenção da derivada da referência, $\dot{i}^*$, pela não-causalidade associada à operação diferencial. Nesse contexto, várias técnicas podem ser adotadas para aproximar uma função de sua derivada, uma das mais simples é a inserção de um filtro passa alta, como descrito em (18).

$$si^* \approx \frac{\omega_c s}{s + \omega_c} i^* \tag{18}$$

em que w_c denota a frequência de corte do filtro.

Inserindo o filtro na análise, o sistema em malha fechada pode ser escrito como

$$\frac{i}{i^*} = \frac{k_1 s^2 + k_2 s + k_3}{s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3}. \tag{19}$$

em que $k_1 = (\omega_c + c_1 + c_2)$, $k_2 = \big((c_1 + c_2)\omega_c + c_1c_2 + 1\big)$ e $k_3 = \big(\omega_c(c_1c_2 + 1)\big)$.

A dinâmica do sistema em malha aberta pode ser determinada por

$$\frac{i}{e} = \frac{\frac{i}{i^*}}{1 - \frac{i}{i^*}}. \tag{20}$$

O que resulta em

$$\frac{i}{e} = \frac{k_1 s^2 + k_2 s + k_3}{s^3}. \tag{21}$$

Ressalta-se que, incertezas paramétricas podem ser relevantes para o algoritmo *backstepping*, tendo em vista que esta técnica leva em conta o parâmetro L em sua ação de controle. Por isso, uma análise incluindo tal efeito deve ser realizada para garantir a eficácia do método. Deste modo, seja a lei de controle definida como

$$u = \tilde{L}\Big((c_1 + c_2)e + (c_1c_2 + 1)\int_0^t e dt + \dot{i}^*\Big) + v_g \tag{22}$$

em que $\tilde{L}$ é uma aproximação da indutância, podendo assumir valores diferentes do parâmetro real do sistema.

Define-se a razão entre a indutância estimada e a real como sendo

$$\mu \triangleq \frac{\tilde{L}}{L}. \tag{23}$$

Como consequência, o sistema em malha aberta (21) pode ser reescrito incluindo o efeito causado pelas incertezas paramétricas, como descrito em (24). A variável v_g foi desprezada nessa análise.

$$\frac{i}{e} = \mu\frac{k_1 s^2 + k_2 s + k_3}{s^3 + \big(\omega_c(1 - \mu)\big)s^2} \tag{24}$$

Analisando a equação (24), nota-se que o filtro passa alta, adotado para aproximar a derivada da referência, possui uma influência relevante na dinâmica do sistema com incertezas paramétricas, pois a frequência de corte do filtro ω_c multiplica $(1 - \mu)$. Dessa forma, quanto maior a

frequência de corte do filtro, mais a função se assemelha a uma derivada, no entanto o sistema fica mais sensível a incertezas paramétricas.

3. ANÁLISE E METODOLOGIA DE PROJETO DO ALGORITMO *BACKSTEPPING*

Nesta seção são apresentadas análises computacionais, utilizando as equações descritas na seção 2.1, em que são verificados os impactos da variação de ganhos e incertezas paramétricas no algoritmo *backstepping*.

3.1 Análise do algoritmo backstepping

Pelo conhecimento do autor, o impacto da escolha dos ganhos c_1 e c_2 do algoritmo *backstepping* não são abordados pela literatura. Por isso, faz-se necessário uma análise mais profunda do impacto dos ganhos na dinâmica e robustez do sistema.

Destaca-se, conforme (15), que os ganhos do algoritmo *backstepping* são fatores que multiplicam o erro de referência e a integral do erro, que demonstram certa similaridade com o compensador proporcional integral. Porém, diferentemente deste compensador, há uma dependência entre o ganho proporcional ao erro e o ganho integral. Assim, o projetista dessa técnica não pode escolher qualquer combinação entre ganho proporcional e integral, ficando limitado a uma região específica. Para ilustrar tal efeito, na Figura 3 é apresentado um plano que delimita as regiões de escolha dos ganhos, no algoritmo *backstepping*, o projetista apenas pode escolher a combinação de ganhos representado na parte inferior do gráfico.

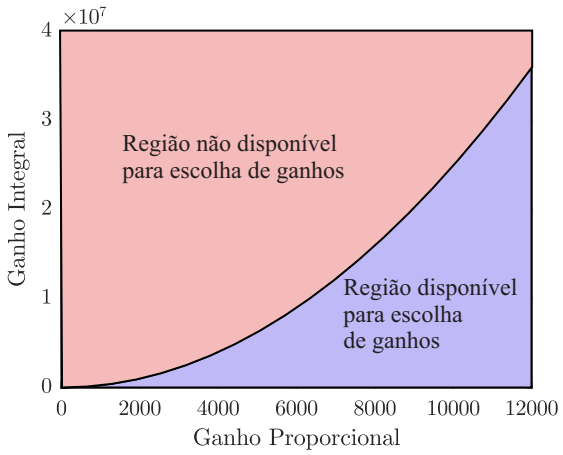

Figura 3. Regiões que delimitam a combinação de escolha de ganhos no algoritmo *backstepping*.

Para ilustrar o impacto dos ganhos na frequência de corte do sistema, a técnica *backstepping* é implementada com base em (1), utilizando o programa matemático MATLAB (2015). Na Figura 4, é ilustrado a frequência de corte do sistema quando variados os ganhos c_1 e c_2, com $\omega_c = 2\pi 100$. Verifica-se que, na técnica *backstepping*, os ganhos c_1 e c_2 tem relevância equivalente na frequência de corte do sistema, apresentado um gráfico simétrico. Também, nota-se que quanto maiores os ganhos, maior é a frequência de corte do sistema.

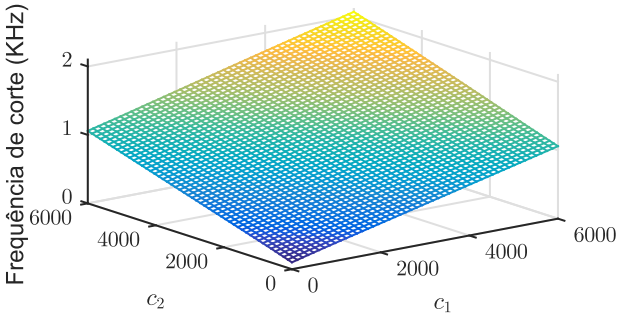

Figura 4. Comparação da frequência de corte de acordo com os ganhos do algoritmo *backstepping*.

Além disso, os polos reais de malha fechada mais próximos do plano s direito foram computados, justamente por serem os polos que estão mais próximos da região de instabilidade. Na Figura 5, são ilustradas as localizações destes polos em função da variação de ganhos. Observa-se que, aumentando os ganhos da técnica *backstepping*, os polos do sistema tendem a se mover para baixo, o que é equivalente a se mover para esquerda no plano s, demonstrando maior robustez, conforme esperado pela análise de Lyapunov dada em (14). Ainda, um ponto de saturação é verificado quando os ganhos c_1 e c_2 se tornam grandes o bastante, nesse caso, o polo do sistema coincide com o polo do filtro passa alta (18).

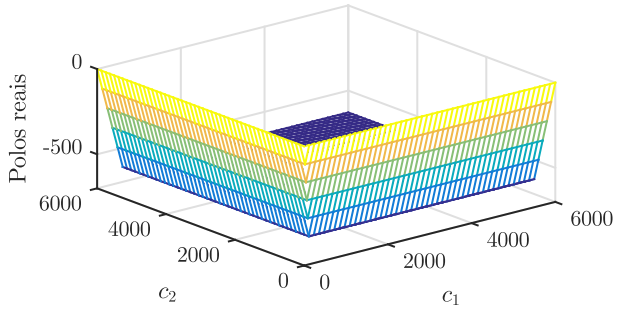

Figura 5. Comparação entre os polos mais próximo do plano direito do sistema (1) quando aplicado o algoritmo *backstepping*.

As margens de estabilidade também foram avaliadas, porém a margem de ganho será excluída da análise, tendo em vista que, para esse sistema analisado, a técnica facilmente permite obter margem de ganho infinita, prejudicando a visualização gráfica. Assim, a margem de fase foi computada e ilustrada na Figura 6, nota-se que, no algoritmo *backstepping*, a margem de fase tende a ser menor quanto maiores os ganhos c_1 e c_2.

3.2 Análise backstepping com incertezas paramétricas e variação do filtro passa alta.

Como descrito em 2.1, tanto a frequência de corte do filtro passa alta, quanto incertezas paramétricas, podem alterar significativamente a dinâmica do algoritmo *backstepping*, por isso computações numéricas são realizadas para avaliar tais efeitos.

Inicialmente, uma variação da frequência de corte do filtro passa alta (ω_c) é ilustrada pela Figura 7. Verifica-se que, a

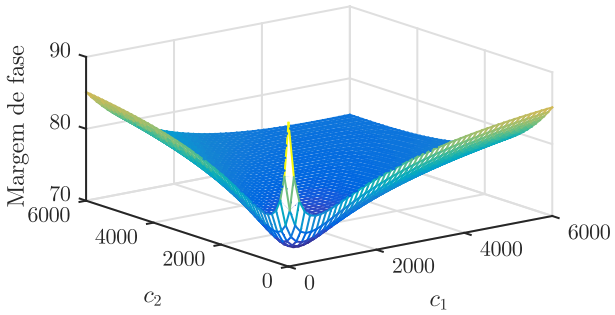

Figura 6. Comparação da margem de fase do sistema (1) quando aplicado o algoritmo *backstepping*.

escolha de ω_c tem grande relevância na margem de fase e na frequência de corte do algoritmo *backstepping*. Também é importante realçar que, a menor frequência de corte do sistema é exatamente a frequência de corte do filtro (quando $c_1 = c_2 = 0$). Ainda, nota-se que, quanto maior ω_c, maior a frequência de corte do sistema, em outras palavras, mais rápida é a resposta do sistema.

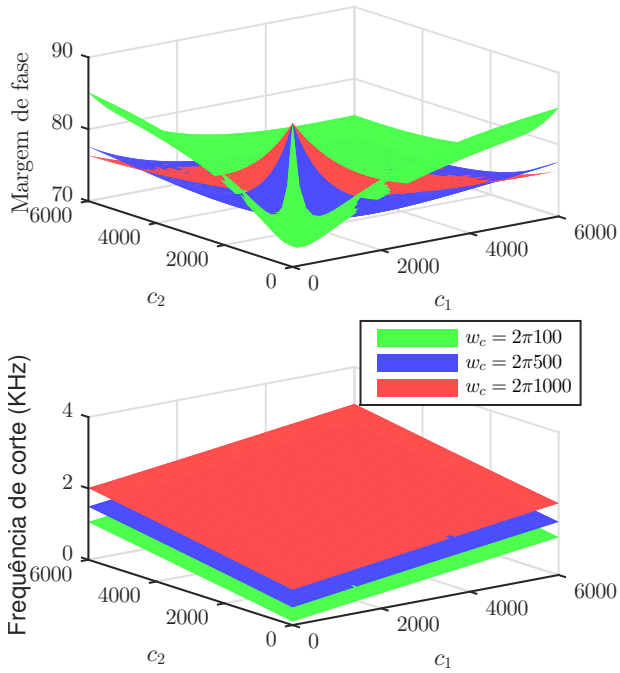

Figura 7. Análise do impacto da escolha de ω_c na margem de fase e na frequência de corte do sistema quando utilizado o algoritmo *backstepping*.

Na Figura 8 é ilustrado o efeito que as incertezas paramétricas inserem no sistema, é possível observar que, o sistema é afetado significativamente na margem de fase, ficando menor quanto maior a razão entre a indutância estimada e a real μ. Ainda, as incertezas paramétricas não alteram consideravelmente a frequência de corte do sistema.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para validar as análises realizadas, simulações numéricas foram obtidas utilizando o programa PSIM (2011). São

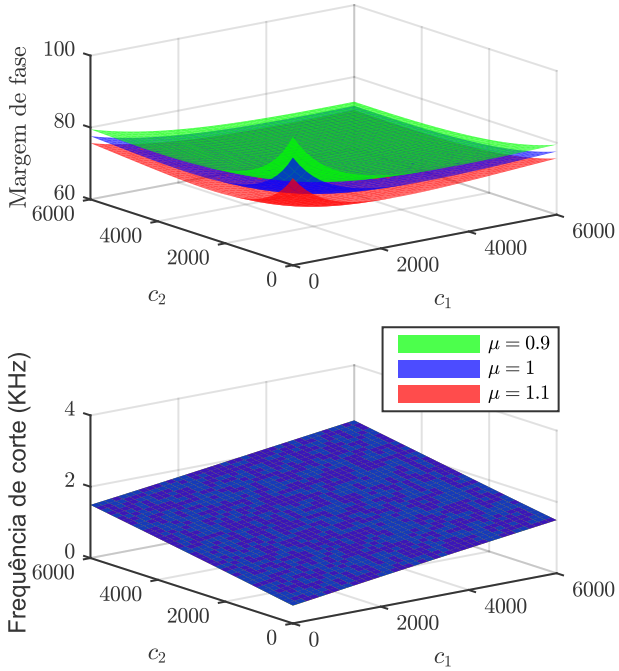

Figura 8. Análise do impacto das incertezas paramétricas na margem de fase e na frequência de corte do sistema quando utilizado o algoritmo *backstepping*.

apresentadas comparações entre o algoritmo *backstepping* e o controlador proporcional integral, assim como análises dos efeitos causados por variações paramétricas no algoritmo *backstepping*.

4.1 Resposta ao degrau

Com o intuito de validar a dinâmica do algoritmo *backstepping*, foram realizadas simulações utilizando um circuito monofásico com fonte ideal e um indutor $L = 5mH$. A técnica foi projetada para obter frequência de cruzamento próxima de $1kHz$, para isso os ganhos $c_1 = 3168$ e $c_2 = 3168$ foram escolhidos. Ainda, como foi demonstrado pela equação (24), a dinâmica do algoritmo *backstepping* depende da escolha da frequência de corte do filtro passa alta ω_c e do conhecimento do parâmetro L. Desta forma, uma simulação foi realizada alterando ω_c e μ, ilustrada na Figura 9. Verifica-se que, as inferências feitas nas análises anteriores são condizentes com a simulação realizada, quanto maior a variável μ, menor é a margem de fase do sistema e quanto maior a frequência de corte do filtro ω_c, mais rápido a resposta do sistema.

4.2 Resposta ao conversor conectado à rede

A técnica também foi implementada no circuito da Figura 1, com o intuito de verificar a eficácia em conversores conectados à rede, em que foi utilizada transformada de Clarke para a implementação do algoritmo, Remus Teodorescu (2011).

Atualmente, técnicas discretas de controle são de grande relevância por serem facilmente ajustáveis e permitirem

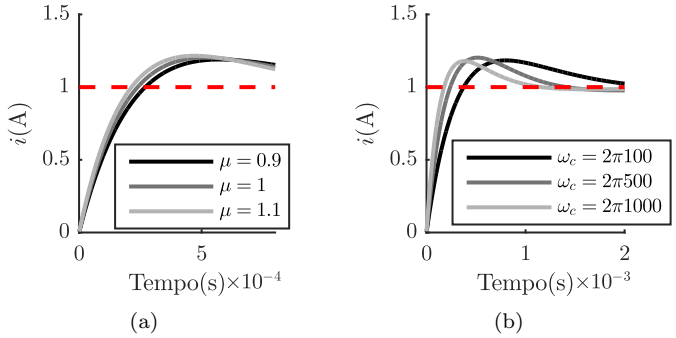

Figura 9. Resposta ao degrau do sistema quando implementado o algoritmo *backstepping*. (a) resposta com variação paramétrica, (b) resposta com variação de ω_c.

implementar técnicas complexas com maior facilidade. Diante disso, o algoritmo *backstepping* é discretizado utilizando o método de Tustin em um tempo de amostragem $T_s = 1/12000$, o algoritmo *backstepping* no domínio de tempo discreto é descrito em (25).

$$u_{\alpha\beta} = \frac{33,77z + 29,59}{z - 1} e_{\alpha\beta} + \frac{612,3z - 612,3}{z - 0,949} i^*_{\alpha\beta} + v_{g\alpha\beta} \tag{25}$$

Para simulação, a técnica foi implementada utilizando o programa PSIM (2011), os ganhos adotados são os mesmos que os usados para a resposta ao degrau. A tensão de barramento é definida como $V_{DC} = 400V$ e a tensão de rede é $v_g = 110Vrms$. Para técnica de modulação, a abordagem geométrica é utilizada Ryan et al. (1999).

Na Figura 10 é ilustrada a resposta do inversor trifásico quando o algoritmo *backstepping* é aplicado, em que as correntes do conversor nos eixos estacionários $i_{\alpha\beta}$ e os sinais de controle $u_{\alpha\beta}$ são demonstrados, um acréscimo de impedância de $3mH$ é feita no tempo $t = 16.67ms$. Verifica-se que, o algoritmo *backstepping* pode ser facilmente implementado utilizando as análises para escolha dos ganhos, a técnica consegue compensar o acréscimo de impedância realizado e mitigar satisfatoriamente os erros de referências.

Além disso, taxas de distorções harmônicas são comumente presentes na rede elétrica. Desta forma, uma simulação foi realizada para verificar a resposta do algoritmo quando a quinta e a sétima harmônica estão presentes na rede elétrica. Na Figura 12 é ilustrada esta simulação, em que as harmônicas são inseridas no tempo $t = 16.67ms$, nota-se que o algoritmo consegue compensar satisfatoriamente o efeito das distorções, alterando o sinal de controle $u_{\alpha\beta}$ de forma a cancelar as duas harmônicas, garantindo um sinal senoidal para as correntes.

Por último, uma simulação é realizada para verificar a resposta do algoritmo na ocorrência de uma falta elétrica, na Figura 12 é ilustrada a resposta do sistema quando ocorre uma falta bifásica entre as fases b e c, esta perturbação é facilmente compensada pelo algoritmo, que altera o sinal de controle u_β para garantir o rastreamento eficaz da referência.

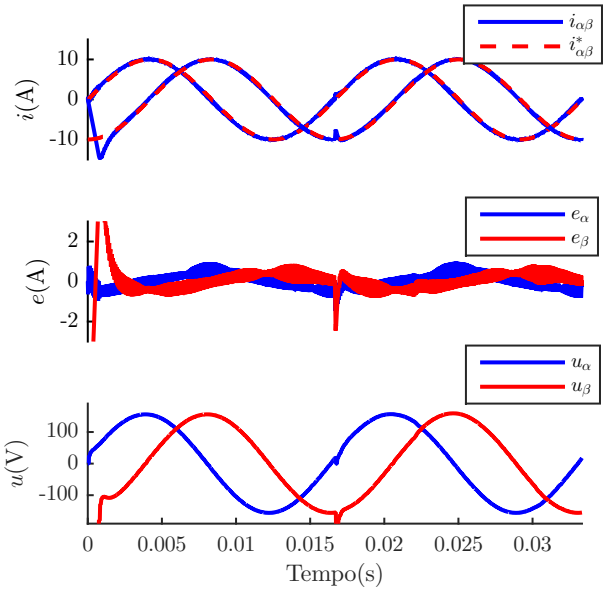

Figura 10. Resultado de simulação ilustrando a resposta do inversor trifásico conectado à rede com o algoritmo *backstepping*, em que um aumento de impedância é realizado.

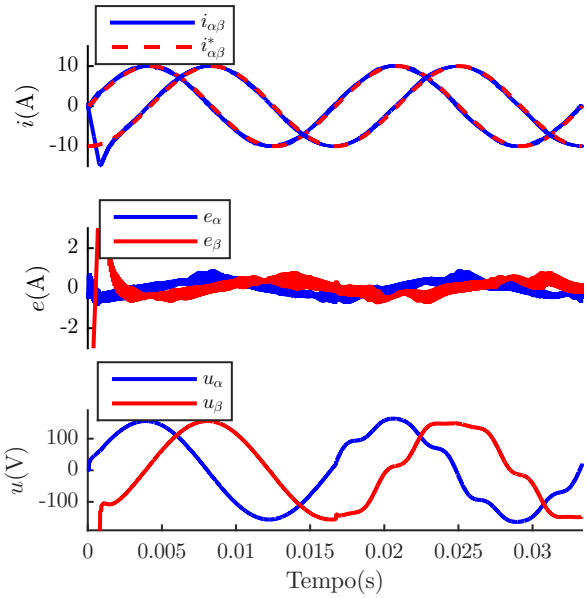

Figura 11. Resultado de simulação ilustrando a resposta do inversor trifásico conectado à rede com o algoritmo *backstepping*, em que a quinta e a sétima harmônica são inseridas na rede elétrica.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise da dinâmica do algoritmo *backstepping* para conversor conectado à rede. Tal análise pode facilitar o projeto do algoritmo, podendo se estender para sistemas mais complexos.

Foi verificado que esta metodologia depende intrinsecamente da derivada da referência, o que pode ser um problema em aplicações práticas, porém, pode-se contornar este problema com aproximações da operação diferencial.

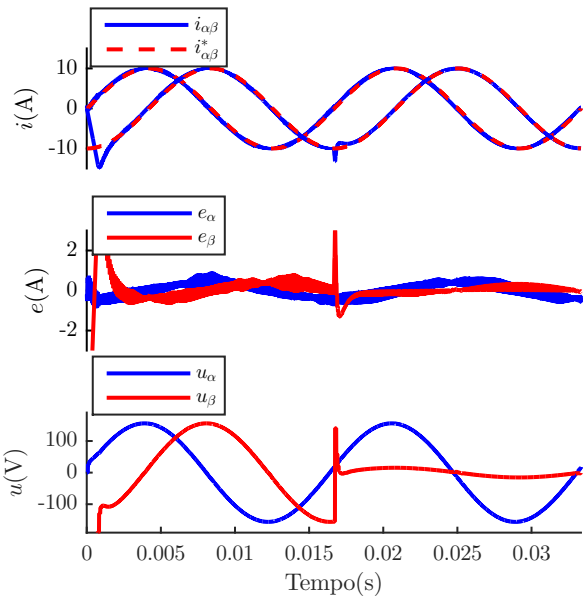

Figura 12. Resultado de simulação ilustrando a resposta do inversor trifásico conectado à rede com o algoritmo *backstepping*, em que uma falta bifásica entre as fases b e c ocorre.

Neste trabalho, a aproximação da derivada foi implementada através de um filtro passa alta. Tal filtro tem um impacto relevante na dinâmica do modelo, principalmente na menor frequência de corte do sistema, quando os ganhos c_1 e c_2 tendem a zero.

Além disso, foram feitas análises com incertezas paramétricas, ressaltando o impacto gerado pela estimação do parâmetro L, sendo que uma estimação incorreta pode levar o sistema a operar de forma indesejada, tendo um impacto relevante na sua margem de fase.

Por fim, resultados de simulações foram apresentados, comprovando a teoria abordada e demonstrando a eficácia do algoritmo *backstepping* no controle do conversor conectado à rede, mesmo operando com adversidades, como variação de impedância, distorções harmônicas e faltas elétricas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Busada, C.A., Jorge, S.G., e Solsona, J.A. (2018). Resonant current controller with enhanced transient response for grid-tied inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 2935–2944.

Dannehl, J., Wessels, C., e Fuchs, F.W. (2009). Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2), 380–388. doi:10.1109/TIE.2008.2008774.

Dehkordi, N.M., Sadati, N., e Hamzeh, M. (2017). A Robust Backstepping High-Order Sliding Mode Control Strategy for Grid-Connected DG Units With Harmonic/Interharmonic Current Compensation Capability. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 561–572. doi:10.1109/TSTE.2016.2611383.

Falkowski, P. e Sikorski, A. (2018). Finite Control Set Model Predictive Control for Grid-Connected AC-DC Converters with LCL Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 2844–2852. doi:10.1109/TIE.2017.2750627.

Guo, B., Su, M., Sun, Y., Wang, H., Dan, H., Tang, Z., e Cheng, B. (2019). A Robust Second-Order Sliding Mode Control for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Voltage Source Inverter. *IEEE Access*, 7, 53202–53212. doi:10.1109/ACCESS.2019.2912033.

Kokotovic, P.V. (1992). The joy of feedback: nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*, 12(3), 7–17.

Kwan, C.M. e Lewis, F.L. (2000). Robust Backstepping Control of Induction Motors Using Neural Networks. 11(5), 1178–1187.

Martins, L.T., Stefanello, M., Pinheiro, H., e Vieira, R.P. (2019). Current Control of Grid-Tied LCL-VSI with a Sliding Mode Controller in a Multiloop Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 8993(c), 1–1. doi:10.1109/tpel.2019.2905717.

MATLAB (2015). *version 8.6 (R2015b)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.

Mazenc, F. e Bliman, P.. (2006). Backstepping design for time-delay nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(1), 149–154.

Nikdel, N., Badamchizadeh, M., Azimirad, V., e Nazari, M.A. (2016). Fractional-order adaptive backstepping control of robotic manipulators in the presence of model uncertainties and external disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), 6249–6256. doi:10.1109/TIE.2016.2577624.

PSIM (2011). *version 9.1*. Powersim., Rockville, Maryland.

Remus Teodorescu, Marco Liserre, P.R. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, volume 1. John Wiley & Sons, 1 edition.

Ryan, M.J., Lorenz, R.D., e De Doncker, R. (1999). Modeling of multileg sine-wave inverters: a geometric approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(6), 1183–1191.

Swaroop, D., Hedrick, J.K., Yip, P.P., e Gerdes, J.C. (2000). Dynamic Surface Control for a Class of Nonlinear Systems. 45(10), 1893–1899.

Wu, J. e Lu, Y. (2019). Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for Boost Converter With Constant Power Load. *IEEE Access*, 7, 50797–50807. doi:10.1109/ACCESS.2019.2910936.

Wu, W., Sun, Y., Lin, Z., Tang, T., Blaabjerg, F., e Chung, H.S. (2014). A new *lcl*-filter with in-series parallel resonant circuit for single-phase grid-tied inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(9), 4640–4644.

Yin, H., Dai, Z., Lei, X., e Lan, T. (2019). Grid current low-order harmonics suppression of the three-phase grid converter with an LCL filter under the distorted grid voltage. *The Journal of Engineering*, 2019(7), 4675–4680. doi:10.1049/joe.2018.8037.

Zuo, Z. e Mallikarjunan, S. (2017). $\mathcal{L}_1$ adaptive backstepping for robust trajectory tracking of uavs. *IEEE Tran-*

sactions on Industrial Electronics, 64(4), 2944–2954. doi:10.1109/TIE.2016.2632682.