

## Análise e controle de inversores para conexão de recursos distribuídos de energia a rede elétrica

### Inverter analysis and control for connecting distributed power resources to the grid

#### RESUMO

**Marcelo Piveta**  
[marcelo9988@hotmail.com](mailto:marcelo9988@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Pato  
Branco, Paraná, Brasil

**Emerson Giovani Carati**  
[emerson.carati@gmail.com](mailto:emerson.carati@gmail.com)  
Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Pato  
Branco, Paraná, Brasil

Este artigo apresenta a análise e a implementação computacional de um sistema de controle para um inversor monofásico conectado à rede elétrica. A partir da tensão medida no ponto de conexão (PCC) do inversor à rede, é utilizada uma abordagem PLL (do inglês, *Phase-Locked Loop*) para obter o sincronismo do sistema. Um gerador de corrente de referência e uma estrutura de controle proporcional-integral-ressonante (PIR) de corrente são aplicados para controlar o despacho de potência do inversor. Além disso, técnicas de amortecimento ativo e compensação harmônica também são usadas para melhorar a estabilidade do sistema de controle e a qualidade da energia. Resultados de simulações computacionais são apresentados para validação da estrutura de controle, bem como para a análise da dinâmica do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inversor. Controle. Geração distribuída.

#### ABSTRACT

This paper presents the analysis and the computational implementation of a control system of a single-phase inverter connected to the electric power grid. From the measured voltage at the point of connection (PCC) of inverter to the power grid, a Phase-Locked Loop (PLL) approach is used in order to achieve the system synchronism. A reference current generator and an integral resonant proportional current controller (PIR) are applied to control the inverter power dispatch. In addition, active damping and harmonic compensation are also used to improve stability in the control loop and power quality. Results from computational simulations are shown for validation of the control structure, as well as for the analysis of the system dynamics.

**KEYWORDS:** Inverter. Control. Distributed generation.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da geração fotovoltaica é o fato dos painéis solares gerarem apenas tensão contínua, enquanto que a tensão da rede elétrica é alternada. Para resolver esta incompatibilidade, algumas estratégias podem ser adotadas, dentre elas, o uso de conversores estáticos de energia, que adequam a tensão dos painéis aos níveis da rede para que possa ocorrer a conexão entre estes.

Visando investigar este problema da conexão entre os sistemas de geração distribuída e a rede elétrica, neste trabalho é realizada a análise de uma das etapas necessárias para que esta ligação ocorra: a operação do circuito inversor, responsável pela conversão da tensão contínua dos painéis para tensão alternada. Ademais, é realizada a análise de uma estratégia de controle para o conversor, que permite a adequação da tensão alternada gerada pelo inversor aos níveis da rede.

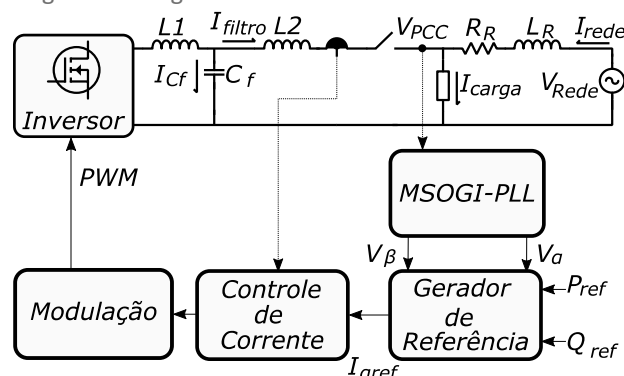
Para a realização deste estudo, é realizada a modelagem de um sistema de geração distribuída, um inversor PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*) com filtro LCL, com potência nominal de 1kW. Visando o desenvolvimento de uma estratégia de controle que permita a conexão entre o sistema modelado e a rede, tal modelo é implementado em simulações computacionais no software PSIM de forma que a se possa realizar a análise das dinâmicas do sistema.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o sistema inversor seja conectado à rede, é necessário realizar o sincronismo entre sua tensão de saída e a tensão da rede. Tal sincronismo é necessário para evitar que exista uma grande tensão sobre a impedância da rede, que normalmente é muito pequena, o que originaria correntes muito altas. Além disso, é desejável controlar a potência enviada do inversor para a carga local e para a rede.

A principal ideia para este controle de potência é maximizar a potência despachada para a rede de distribuição, fazendo com que as cargas conectadas sejam alimentadas, o máximo possível, pelo inversor. Ademais, a potência reativa fornecida pelo sistema à rede também pode ser ajustada. Desta forma, a malha de controle apresentada na Figura 1 é utilizada.

Figura 1 – Diagrama do sistema de controle do inversor

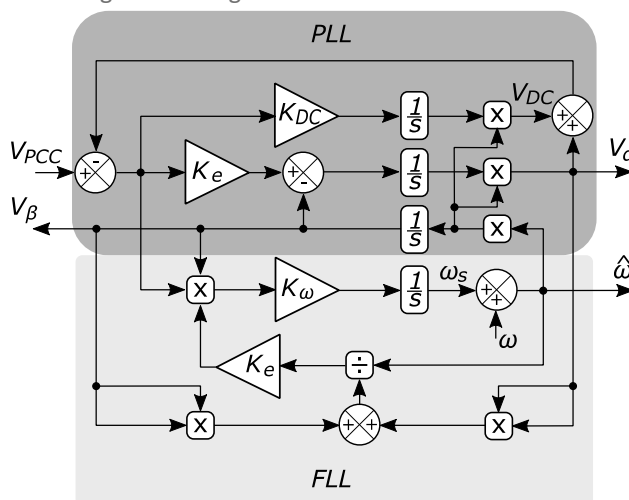


Fonte: Liston Júnior (2015).

### MSOGI-PLL

A primeira etapa da malha de controle é um sistema PLL (*Phase-Locked Loop*), que realiza o sincronismo a tensão de saída do inversor com a tensão da rede. Na literatura, são apresentadas diversas topologias diferentes para a implementação de um sistema PLL, conforme Liston Júnior (2018, p. 33). A abordagem utilizada é o MSOGI-PLL, pois é capaz de estimar a frequência da rede e eventual nível CC em sua tensão. O diagrama de blocos do MSOGI-PLL é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de blocos do MSOGI-PLL



Fonte: Liston Júnior (2018).

### GERADOR DE CORRENTE DE REFERÊNCIA

Baseado na abordagem de Teodorescu (2011, p. 221), a obtenção da corrente de referência é feita a partir da potência ativa de referência e da potência reativa de referência ( $P_{ref}$  e  $Q_{ref}$ , respectivamente), além das componentes da tensão do ponto de conexão, que pode ser obtido a partir das componentes geradas pelo algoritmo PLL ( $V_\alpha$  e  $V_\beta$ ) e da potência ativa do barramento CC ( $P_{ref} = P_{CC}$ ). Desta forma, a corrente de referência obtida é dada pela Eq. (1).

$$I_{aref} = \frac{V_\alpha P_{ref} - V_\beta Q_{ref}}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (1)$$

### CONTROLADOR DE CORRENTE

Para o controle de corrente do inversor, são utilizados dois elementos: um controlador proporcional-integral-ressonante (PIR), conforme abordagem de Stojic (2017, p. 2), e um termo de amortecimento ativo, conforme Julean (2009, p. 43). A parcela ressonante do controlador tem por finalidade zerar o erro em regime permanente a partir da referência de característica senoidal e inclui um termo de amortecimento ( $\zeta=1$ ), conforme Zammit (2014, p. 2). Já o termo integral tem por função eliminar qualquer componente CC na corrente. A parcela proporcional

serve para acelerar a ação do controlador. A função de transferência do controlador é dada pela Eq.(2).

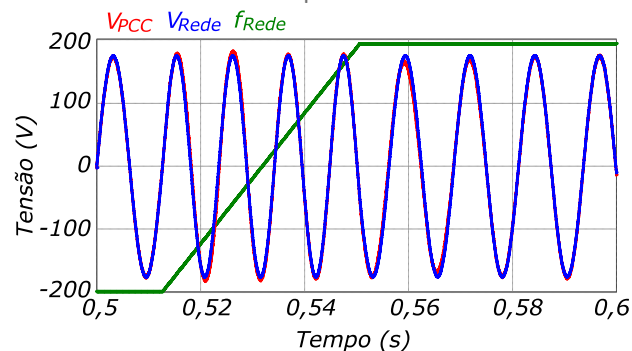
$$G_{PIR}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{2K_R s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (2)$$

Onde  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_R$  são, respectivamente, os ganhos proporcional, integral e ressonante do controlador. Os termos  $\omega$  e  $\omega_c$  representam, respectivamente, a frequência de referência e a frequência de corte da parcela ressonante.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra o comportamento do sistema mediante uma variação em 1Hz na frequência da rede, de 60Hz para 61Hz, em um intervalo de tempo de 50ms. Tal distúrbio deve ser compensado pelo MSOGI-PLL, permitindo que se mantenha o sincronismo do sistema.

Figura 3 – Comportamento da tensão sobre a carga para uma variação linear de frequência



Fonte: Autoria própria (2018).

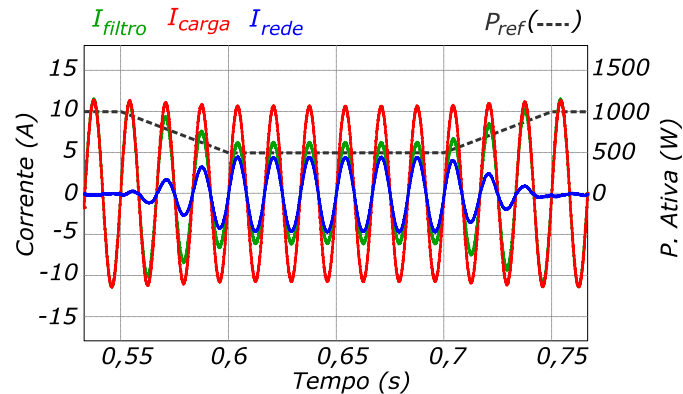
A partir da análise da Figura 3, percebe-se que mesmo durante o período de variação da frequência a tensão sobre a carga se manteve muito próxima da tensão da rede. Ademais, vale ressaltar que o período de convergência após a variação é reduzido ( $t_{conv} < 50ms$ ). Assim, comprova-se o correto funcionamento do sistema de sincronismo, bem como sua capacidade de ajustar a frequência identificada do sistema, mesmo sob perturbações.

Além do sincronismo com a rede, deseja-se também que a potência despachada pelo sistema inversor possa ser controlada. Dessa forma, torna-se possível a minimização da potência consumida a partir da rede elétrica, bem como o controle do despacho de potência para a rede. O comportamento das correntes no ponto de conexão mediante uma variação da potência ativa de referência ( $P_{ref} = 1000W \rightarrow 500W$ ) para a saída do inversor a partir da malha de controle é mostrada na Figura 4.

Analisando a Figura 4, nota-se que com a diminuição da potência ativa de referência para 50% de seu valor nominal a corrente requisitada da rede elétrica se eleva. De forma inversa, ao ajustar a potência de saída do inversor para o valor

nominal da carga, a corrente de rede converge para zero, tornando a potência requisitada desta fonte muito próxima de zero.

Figura 4 – Comportamento das correntes para variação da potência ativa de referência



Fonte: Autoria própria (2018).

## CONCLUSÃO

Este artigo apresenta a análise computacional de um sistema de controle para efetuar a conexão entre a rede elétrica e um circuito inversor utilizado para geração distribuída de energia. O sistema implementado se mostra funcional e com operação condizente ao esperado, conforme mostram os resultados da análise computacional, que evidenciam o funcionamento correto de todas as etapas do controle, bem como da planta. Nota-se que o sistema inversor e sua malha de controle são capazes de atender as especificações para os quais foram projetados, operando até mesmo em condições de distúrbios muito mais extremos que os encontrados em situações práticas. Também é notável a flexibilidade do sistema em relação ao controle da potência a ser despachada pelo inversor, sendo este capaz de se adaptar a operação fora do ponto de potência nominal. Ademais, o sistema atende aos requisitos de distorção harmônica delimitados para a corrente de rede pelo padrão IEEE 519, que especifica limite de 5% para a distorção harmônica, sendo obtido no sistema valores próximos de 0,8%.

## REFERÊNCIAS

LISTON JÚNIOR, R. A. **Estratégia de controle para inversores monofásicos conectados a redes com ampla faixa de parâmetros**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

LISTON JÚNIOR, R. A. **Sistema de controle para conversores estáticos de energia aplicados em geração híbrida distribuída**. 2015. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) –Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

STOJIC, D.; TARCZEWSKI, T.; KLASNIC, I. **Proportional-integral-resonant AC current controller**. In: *Advances in Electrical and Computer Engineering*, v. 17, n. 1, 2017. Disponível em: <http://www.aece.ro/abstractplus.php?year=2017&number=1&article=12>. Acesso em: 18 jan. 2019.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. 1. ed. Reino Unido: Wiley, 2011.

ZAMMIT, D.; STAINES, C. S.; APAP, M. **PR current control with harmonic compensation in grid connected PV inverters**. In: *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, v. 8, n. 11, 2014. Disponível em: <https://waset.org/publications/9999925/pr-current-control-with-harmonic-compensation-in-grid-connected-pv-inverters>. Acesso em: 20 jan. 2018.

JULEAN, A. **Active damping of LCL filter resonance in grid connected applications**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Aalborg Universitet, Aalborg, 2009.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária FA – Paraná/Brasil.