

Investigação de técnicas de controle para inversores conectados a rede

Grid-tied inverters control techniques: a research on

RESUMO

Marcelo Piveta
marcelo9988@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Emerson Giovanni Carati
emerson@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Este artigo apresenta a análise e a implementação computacional de uma estratégia de controle principal com estruturas auxiliares de amortecimento para um inversor monofásico conectado à rede elétrica. O controlador principal tem como objetivo permitir a regulação despacho de potência do sistema inversor para a rede elétrica e o sincronismo entre esses sistemas, sendo composto por 3 etapas principais: sistema de sincronismo, geração de corrente de referência e controlador de corrente. As estruturas auxiliares discutidas, que tem por finalidade permitir que o sistema inversor opere de forma estável sob diferentes condições de carga local e parâmetros de rede elétrica, são: amortecimento passivo, amortecimento baseado em filtro digital notch e amortecimento por realimentação de variável de estado. Resultados de simulações computacionais são apresentados para validação do comparativo realizado entre as estruturas auxiliares, considerando seus respectivos impactos sobre a estabilidade e qualidade da energia do sistema inversor.

PALAVRAS-CHAVE: Geração distribuída. Controle. Amortecimento.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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



This paper presents the analysis and computational implementation of a main control strategy with auxiliary damping structures for a single-phase grid-tied inverter. The main controller loop has the objective of allowing the regulation of the power dispatch and synchronism between the inverter system and the electrical grid. It is composed of three main stages: synchronism system, reference current generation, and current control. The auxiliary structures, whose purpose is to allow the stable operation of the inverter system under different local load conditions and electrical grid parameters, are passive damping, digital notch filter based damping, and state variable feedback based damping. Computational simulations results are presented to validate the comparison made between the auxiliary structures, considering their impacts on the inverter system's stability and energy quality.

KEYWORDS: Distributed generation. Control. Damping.



INTRODUÇÃO

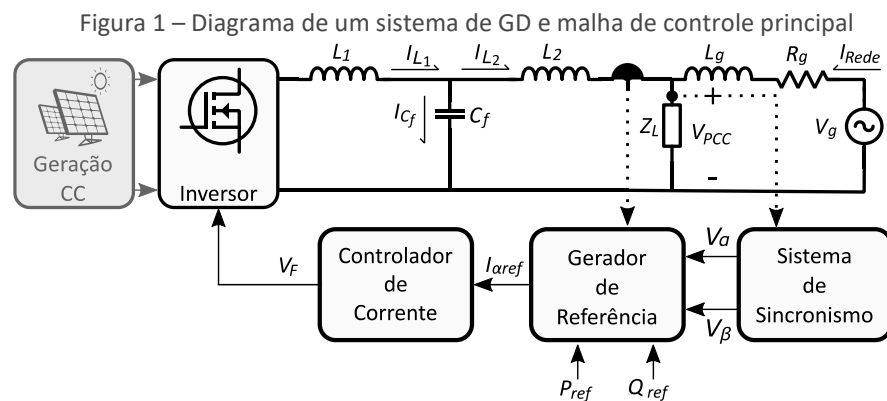
De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 (EPE, 2018), a geração fotovoltaica distribuída no Brasil deve receber um grande aumento nos próximos anos. Com esta expansão surgem alguns desafios, como a operação das unidades de geração distribuída (GD) conectadas à rede elétrica. Um sistema de geração fotovoltaica distribuída típico é composto basicamente pelos seguintes elementos: painéis fotovoltaicos, conversores estáticos de potência e filtro passivo de saída. A finalidade de um sistema como este é a conversão e o despacho controlado da potência gerada para a rede elétrica.

Além do controle do despacho de potência, outro desafio apresentado na operação de unidades de GD é a conservação da estabilidade de operação do sistema. Devido ao uso de filtros passivos de saída geralmente nas topologias LC e LCL, modos ressonantes estão presentes nos sistemas de GD. Além disso, a frequência de ressonância característica desses modos é dependente de parâmetros que podem variar no tempo (carga local e impedância da rede elétrica) (HOFFMANN, 2012).

Para amenizar problemas relacionados à ressonância, estruturas auxiliares de amortecimento podem ser utilizadas em conjunto ao controle principal de unidades de GD. Na literatura, diversas abordagens para essas estruturas são apresentadas (HAN *et. al*, 2019). Neste trabalho, algumas das possíveis soluções para a estabilização de um sistema de GD são discutidas e comparadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o controle principal do sistema de GD é utilizada uma estrutura conforme apresentada em Liston Júnior (2018), cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Liston Júnior (2018).

O sistema de sincronismo é utilizado para obtenção das componentes da tensão V_{PCC} no referencial $\alpha\beta$, V_α e V_β , que permitem o controle desacoplado de despacho de potência ativa e reativa. O sistema de sincronismo utilizado neste trabalho é o MSOGI-PLL, que possui como vantagem a capacidade de estimar a frequência da rede elétrica e eventual nível CC proveniente da medição de V_{PCC} .

O gerador de corrente de referência utilizado se baseia na expressão

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

em que P_{ref} e Q_{ref} são, respectivamente as potências ativa e reativa de referência.

O controlador de corrente utilizado é o proporcional-ressonante (PR), que possui como principal vantagem a capacidade de minimizar o erro em regime permanente para uma entrada senoidal. A função de transferência do controlador PR é dada por

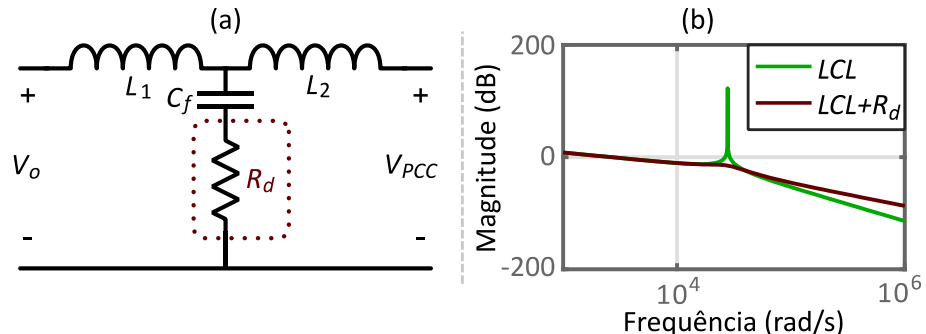
$$G_{PIR}(s) = K_P + \frac{2K_R s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2}, \quad (2)$$

em que K_p é o ganho proporcional, K_R é o ganho da parcela ressonante, ω é a frequência angular fundamental da tensão da rede elétrica (377 rad/s) e ω_c é a frequência de corte do controlador, ajustada em 1 rad/s.

AMORTECIMENTO PASSIVO

A estrutura de amortecimento passivo abordada neste trabalho consiste na inserção de um resistor (R_d) em série com o capacitor C_f do filtro LCL, conforme a Figura 2(a). O efeito inserido por essa técnica é a supressão do pico de ressonância do filtro LCL, conforme ilustrado na Figura 2(b).

Figura 2 – Amortecimento passivo. (a) No circuito do filtro LCL. (b) Diagrama de Bode



Fonte: Adaptado de Peña-Alzola *et. al* (2013).

O dimensionamento de R_d é realizado conforme a metodologia apresentada em Peña-Alzola *et. al* (2013, p.3-6), sendo obtido o valor de $R_d = 0,5 \Omega$.

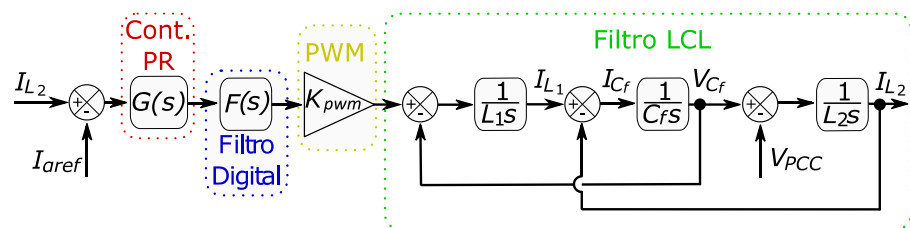
AMORTECIMENTO ATIVO POR FILTRO DIGITAL NOTCH

Para evitar problemas de instabilidade é desejável que não existam componentes da ação de controle (V_f) com frequências próximas à de ressonância do filtro LCL. Dessa forma, a rejeição de tais componentes contribui para a estabilidade do sistema de GD, amortecendo possíveis perturbações nessa faixa de frequências. Uma das possibilidades para este amortecimento é o uso de um filtro digital *notch*, que caracteriza-se pela alta capacidade de rejeição de uma estreita faixa de frequências, em cascata com a saída do controlador de corrente (RODRIGUEZ-DIAZ *et. al*, 2019, p. 2-5). A função de transferência do filtro *notch* é dada por

$$N(s) = G_f \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + Qs + \omega_n^2}, \quad (3)$$

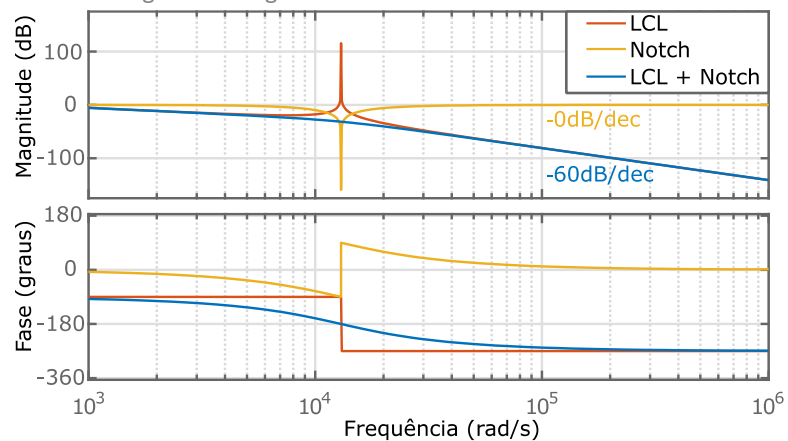
em que ω_n é a frequência de ajuste do filtro, que normalmente é alocada no mesmo valor da frequência de ressonância do filtro LCL, Q é o fator de qualidade e G_f é o ganho do filtro. A Figura 3 mostra a localização do filtro digital para amortecimento ativo no controle do sistema de GD. O efeito de supressão do pico de ressonância do filtro LCL pode ser verificado na Figura 4, que mostra a resposta em frequência dos filtros LCL e *notch* digital.

Figura 3 –Diagrama de blocos do sistema de GD com amortecimento ativo por filtro digital *notch*



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 4 –Diagramas de Bode dos filtro LCL e *Notch*

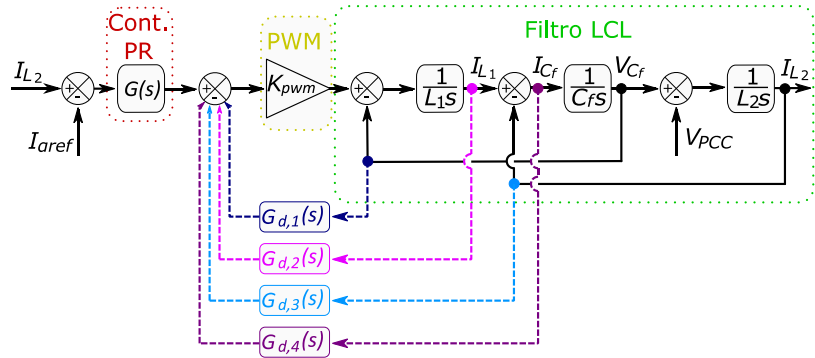


Fonte: Autoria própria (2019).

AMORTECIMENTO ATIVO POR REALIMENTAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ESTADO

Conforme apresentado por Han *et. al* (2019, p.10-13) diversas estruturas de amortecimento baseadas em realimentação de variáveis de estado são discutidas na literatura. Estas técnicas possuem como vantagem a inserção de efeitos semelhantes às estruturas de amortecimento ativo, mas sem impacto negativo sobre a eficiência geral do sistema de GD. A Figura 5 mostra algumas das formas de implementação de amortecimento por realimentação de estados.

Figura 5 – Amortecimento baseado na realimentação de variáveis de estados



Fonte: Han *et. al* (2019).

Dentre as diversas abordagens para amortecimento por realimentação de estados, uma das mais triviais é o uso de um ganho proporcional na corrente I_{cf} (ilustrada na figura 5 por $G_{d,i}(s) = K_A$, sendo K_A um número real). Tal estrutura é recorrente na literatura devido à sua simplicidade e boa capacidade de amortecimento. Por conta de suas vantagens, esta é a estrutura de realimentação de estados analisada no comparativo deste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estruturas de amortecimento discutidas anteriormente são avaliadas individualmente em simulações de um sistema de GD conforme exibido na Figura 1. Os casos avaliados consideram dois conjuntos de impedâncias de rede: $R_g=3 \Omega$, $L_g=3 \text{ mH}$ (Rede 1) e $R_g=500 \mu\Omega$, $L_g=50 \mu\text{H}$ (Rede 2). Além disso, os casos de carga local (Z_L) avaliados são: resistivo-indutivo (RL), não-linear (retificador com carga resistiva e filtro capacitivo) e sem carga local. Em todos os casos, a potência nominal das cargas locais é de $S=8200 \text{ VA}$. A figura 6 mostra as correntes no ponto de conexão para o caso de carga local RL. As demais análises mencionadas são realizadas conforme as mostradas na Figura 6, entretanto, não são exibidas por motivos de espaço.

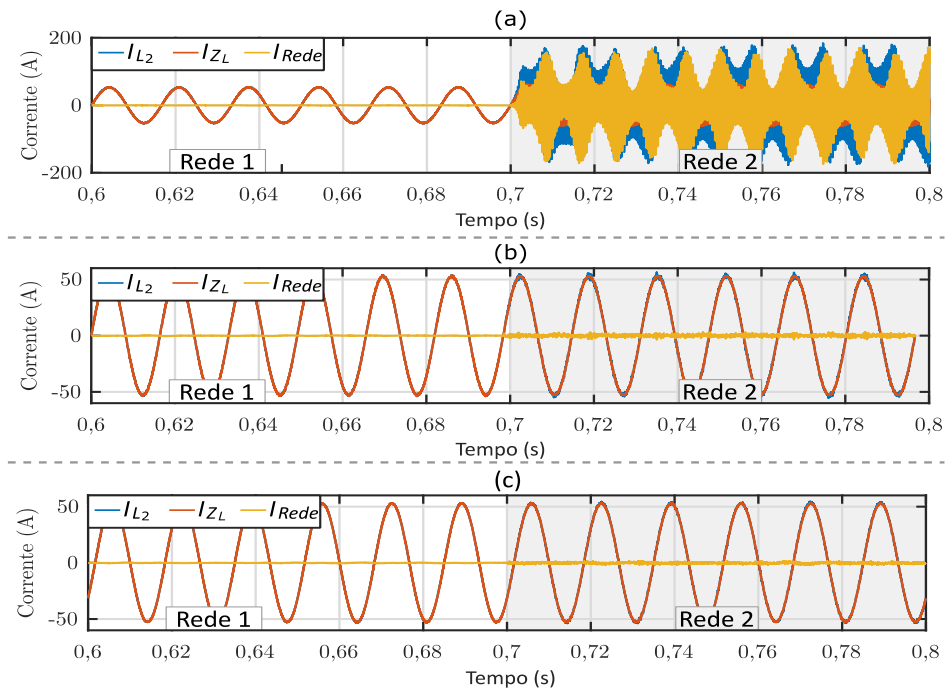
A partir de simulações conforme as exibidas na Figura 6, são obtidos resultados que compõem a Tabela 1, que exhibe em quais casos o sistema de GD atende ao padrão de qualidade de energia IEEE 1547-2018 e a DHT obtida na corrente de saída do sistema de GD (I_{L2}).

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos

		Rede 1			Rede 2			
		Carga Local	Sem Carga	RL	Não-linear	Sem Carga	RL	Não-linear
IEEE	Passivo	✓	✓	✓	X	X	X	X
	Filtro notch	✓	✓	✓	X	✓	✓	X
	Prop. I_{cf}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
DHT	Passivo	0,54%	1,32%	8,42%	-	-	-	-
	Filtro notch	3,33%	0,95%	17,42%	4,24%	2,71%	8,19%	
	Prop. I_{cf}	1,05%	0,88%	4,57%	1,94%	1,73%	3,44%	

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 5 – Correntes no ponto de conexão para diferentes estruturas de amortecimento. (a) Passivo. (b) Filtro digital *notch*. (c) Realimentação proporcional de I_{cf}



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir dos resultados exibidos na Tabela 1, nota-se que a estrutura de amortecimento passivo analisada apresenta os piores resultados. Na maioria dos casos abordados o padrão de qualidade de energia IEEE 1547-2018 não é atendido. Ademais, quando considerada a rede 2, o amortecimento passivo não é capaz de manter a estabilidade do sistema de GD. Vale ressaltar que a capacidade de amortecimento desta estrutura pode ser aprimorada elevando a resistência de R_d , entretanto, o sistema de GD apresenta eficiência geral menor devido a maiores perdas de potência ativa no elemento resistivo de amortecimento.

As estruturas de amortecimento baseadas em filtro digital *notch* e em realimentação proporcional de I_{cf} apresentam resultados semelhantes quanto à estabilidade do sistema de GD, mantendo a operação estável para todos os casos de cargas locais e parâmetros de rede considerados. Conforme exibido na Tabela 1, porém, o amortecimento ativo por realimentação proporcional de I_{cf} apresenta melhores indicadores de qualidade de energia. Verifica-se que para todos os casos abordados essa estrutura auxiliar mantém a DHT da corrente de saída do sistema de GD abaixo do limite de 5%. Apenas para o caso de carga local não-linear e com o sistema de GD conectado à rede 2 o padrão de qualidade de energia IEEE 1547-2018 não é atendido, pois a amplitude máxima de harmônicas individuais é ultrapassada.

CONCLUSÃO

Este artigo apresenta a análise computacional de um sistema de controle para uma unidade de geração distribuída operando com diversas estruturas auxiliares de estabilização. São considerados diferentes casos de impedância da rede elétrica

e carga local. Dentre as técnicas analisadas, a que obtém os melhores resultados é o amortecimento baseado na realimentação de estados, que apresenta DHT inferior a 5% em todos os cenários considerados. O amortecimento ativo baseado em filtro digital *notch* é capaz de permitir a operação estável do sistema de GD para todos os casos analisados. Entretanto, a qualidade da energia é menor do que no caso da realimentação de estados, sendo obtidos níveis de DHT de até 17,42%, que não atendem ao padrão de qualidade de energia IEEE 1547-2018. Já o amortecimento passivo, em alguns casos é insuficiente para manter a estabilidade do sistema de GD, mais notoriamente em situações onde a rede elétrica apresenta uma impedância muito pequena. Entretanto, para os casos em que é capaz de manter a estabilidade do sistema de GD, o amortecimento passivo apresenta níveis adequados de DHT da corrente I_{L2} .

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia 2027**. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027>. Acesso em: 17/05/2019.

HAN, Y.; YANG, M.; LI, H.; YANG, P.; XU, L.; COELHO, E.; GUERRERO, J. Modeling and stability analysis of LCL-type grid-connected inverters: a comprehensive overview. **IEEE Access**. v. 7, p. 114975-115001. 2019.

HOFFMANN, N.; FUCHS, F. W. Online grid impedance estimation for the control of grid connected converters in inductive resistive distributed power networks using extended kalman filter. *In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION*. p. 922-929, 2012. **Anais...** ECCE, 2012.

IEEE- *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1547.2-2008 - IEEE application guide for IEEE standard 1547(TM). **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. p.1-217, abr. 2019.

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.

PEÑA-ALZOLA, R.; LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; SEBASTIÁN, R.; DANNEHL, J.; FUCHS, F. W. Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 6, p. 2642-2646, jun. 2013.

RODRIGUEZ-DIAZ, E.; FREIJEDO, F. D.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Analysis and comparison of notch filter and capacitor voltage feedforward active damping techniques for LCL grid-connected converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 34, n. 4, p. 3958-3972, abr. 2019.