

TÉCNICAS DE CONTROLE MODERNO E APLICAÇÃO EM UM SISTEMA DE GD MONOFÁSICO

Leandro T. Omine^{1*}; Moacyr A. G. de 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

Neste trabalho é apresentada uma avaliação comparativa entre um controlador PI+Ressonante e um controlador em modos deslizantes (SMC – do inglês, Sliding Mode Control), aplicados no controle da corrente a ser injetada na rede a partir de um inversor monofásico com filtro LCL. A dificuldade encontrada no controle deste sistema é a elevada ressonância entre os componentes, podendo levar à instabilidade. Apesar de que a inserção de resistores na planta possa diminuir este efeito, a eficiência do inversor é reduzida. Neste sentido, uma formulação para o SMC capaz de simular estas resistências de modo virtual é apresentada com resultados deste controlador comparados ao convencional via simulações computacionais.

Palavras-chave: Filtro LCL; Controle não-linear; Amortecimento ativo.

Introdução

O uso de fontes alternativas na geração de energia elétrica traz consigo inúmeras vantagens sobre o sistema atual. Estas fontes, representadas principalmente pelos geradores eólicos e painéis solares fotovoltaicos, não produzem elementos tóxicos durante sua operação e podem ser instalados em locais próximos aos consumidores finais, economizando no custo de transmissão em longas distâncias. Suas fontes primárias são inesgotáveis em escala de tempo humana, em oposição às termoelétricas e, a capacidade de geração durante os vários períodos do ano é mais previsível, comparado às hidrelétricas.

Um importante passo na integração de tais fontes com a rede de distribuição energia elétrica existente se faz através do desenvolvimento de conversores eletrônicos, os quais transformam a energia “bruta” gerada, para um formato adequado, isto é, uma onda senoidal com frequência, amplitude, e fase, controladas conforme a solicitação da rede.

Na geração fotovoltaica a energia solar é diretamente transformada em tensão elétrica contínua (CC) e, conseqüentemente, a interconexão com a rede elétrica é realizada então por meio de um inversor. Uma topologia monofásica típica é o inversor fonte de tensão (*VSI – Voltage Source Inverter*) composto por uma ponte H de chaves eletrônicas e um filtro de saída.

O filtro de saída interfere diretamente na qualidade da forma de onda de corrente elétrica que é injetada na rede, sendo necessário no mínimo um indutor em série. Estudos indicam que a topologia LCL apresenta características superiores ao filtro indutivo tanto na atenuação de altas frequências quanto no volume e custo de componentes (JALAYATH, 2017) (WU, 2016). A ordem deste filtro no entanto é um grande inconveniente, já que a ressonância entre componentes dificulta o projeto dos populares controladores clássicos, como exemplo o PI (Proporcional – Integral). Os pontos críticos na escolha e projeto de controladores para este conversor são o rastreamento da referência senoidal e a capacidade de lidar com variações no ponto de operação, sabendo que a energia provida por fontes renováveis pode variar a qualquer instante devido às variações meteorológicas.

Uma técnica ainda baseada na teoria de controle clássica, o controlador PI+Ressonante insere em paralelo ao PI, um compensador de segunda ordem ressonante, o qual irá fornecer um alto ganho na frequência de operação desejada. Com isto é possível reduzir o erro de rastreamento à zero, desde que a sintonização de frequência esteja correta. No entanto como o projeto é baseado em diagramas de Bode, se faz necessária a obtenção de um modelo linearizado da planta, o qual pode não representar fielmente a planta em algumas ocasiões.

O *Sliding Mode Control* (SMC) é uma técnica emergente de controle não linear baseado em chaveamento. É criada uma superfície que divide o espaço de estados em duas regiões, sendo que o objetivo do controlador é fazer com que os estados do sistema atinjam e permaneçam nesta superfície. A lei de controle se comporta de maneira diferente para cada região em separado, sempre direcionando o sistema à referência. Nota-se que em regime permanente o controle irá chavear entre duas leis de controle distintas, em um movimento deslizante sobre a superfície de referência (SEKHRI, 2017). Esta técnica apresenta características robustas (VECCHIO, 2008) e pode ser aplicado tanto em sistemas lineares, quanto não lineares, contanto que a aplicação aceite os ruídos causados pelo deslizamento.

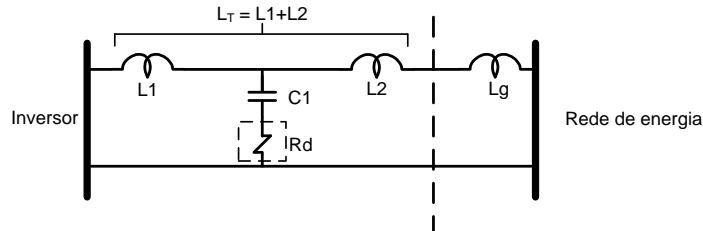
Nas seções seguintes são apresentados o projeto do filtro LCL e de ambos os controladores e, então,

uma análise comparativa destes observando-se as formas de onda de corrente e a distorção harmônica total (DHT) da corrente injetada na rede é apresentada.

Metodologia

O projeto do filtro LCL, ilustrado na Figura 1, segue o método introduzido por Jalayath; Hanif, (2016).

Figura 1 – Filtro LCL interconectando um inversor e a rede de energia.



A expressão para a escolha das indutâncias e da capacitância é dada por (1):

$$L_T C = \frac{k^2}{4\pi^2 f_{sw}^2} \frac{(1+\mu)^2}{\mu}, \quad k = \frac{f_{sw}}{f_{res}}, \quad \mu = \frac{L_g}{L_i} \quad (1)$$

onde f_{sw} é a frequência de chaveamento do inversor e f_{res} é a frequência de ressonância desejada para o filtro. As quantidades k e μ são projetadas de maneira a minimizar (1), e conseqüentemente, o tamanho e peso do filtro. De forma a diminuir os efeitos da ressonância na malha de controle, é adotado primeiramente o método de amortecimento passivo com a inserção de uma resistência em série com o capacitor.

As especificações do inversor assim como os valores obtidos para cada componente podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do Inversor e do Filtro LCL

Tensão de Entrada V_{in} :	250 V
Tensão da Rede (CA) V_g :	127 V_{rms} /180 V_p
Potência Processada :	530 W
Frequência da Rede:	60 Hz
Frequência de Chaveamento f_{sw} :	20 kHz
Indutâncias (L1, L2):	127 μ H
Capacitância (C1):	4 μ F
Resistência de Amortecimento (Rd):	1,33 Ω
Frequência de Ressonância f_{res} :	10 kHz
Frequência de Amostragem:	40 kHz

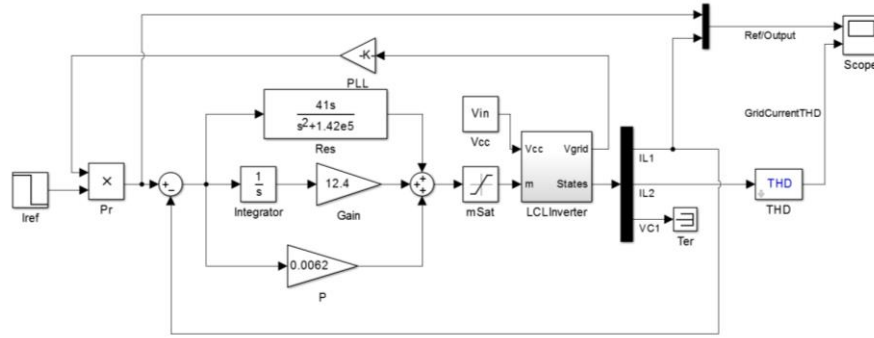
O projeto do controlador PI+Ressonante é realizado com as parcelas PI e Ressonante de forma independente através dos diagramas de Bode de módulo e fase, contanto que a frequência de cruzamento de ganho de ambos sejam iguais. É escolhida uma frequência de 1 kHz para que a oscilação de 60 Hz não tenha grandes efeitos dinâmicos, ainda que possa atenuar oscilações na frequência de ressonância do filtro.

Obtém-se com o auxílio do software MatLab o controlador descrito em (2).

$$C = \frac{0,0062(s+2000)}{s} + \frac{41s}{(s^2 + (60 \cdot 2\pi)^2)} \quad (2)$$

O diagrama de blocos para o controle do sistema contendo o controlador PI+Ressonante, em ambiente Simulink, é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de blocos em Simulink para o PI+Ressonante



O SMC é projetado em dois estágios, sendo o primeiro a escolha de uma superfície s descrita por variáveis de estado e sinais de referência, e o segundo a formulação de uma lei de controle a qual irá direcionar o sistema à superfície e mantê-lo aos redores desta. A liberdade de escolha de s possibilita este controlador a atuar como um amortecedor ativo para a ressonância do filtro LCL, como será visto nas simulações.

A superfície escolhida é apresentada em (3) adotando-se o controle pelo lado do inversor (i_{L1}).

$$s = i_{L1} - i_{L1}^*, \quad (3)$$

onde i_{L1}^* é a referência do sinal. Em todo instante o controle deverá atuar de forma a diminuir o módulo de s . Sendo assim, é calculada a derivada de (3):

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial i_{L1}} \frac{\partial i_{L1}}{\partial t} = \frac{(mV_{in} - V_{C1} - R_d(i_{L1} - i_{L2}))}{L}, \quad (4)$$

sendo m o índice de modulação. Quando $\dot{s} = 0$ é obtida uma expressão de m para o caso ideal onde o sistema opera sobre a superfície deslizante. Esta, como vista em (4), é chamada de lei de controle equivalente.

$$m_{eq} = \frac{(V_{C1} + R_d(i_{L1} - i_{L2}))}{V_{in}}. \quad (4)$$

Como na prática é impossível se obter $s = 0$, são adicionados termos de correção em (4), sendo um destes, a parte principal deste controlador. Portanto, a lei de controle resulta em (5).

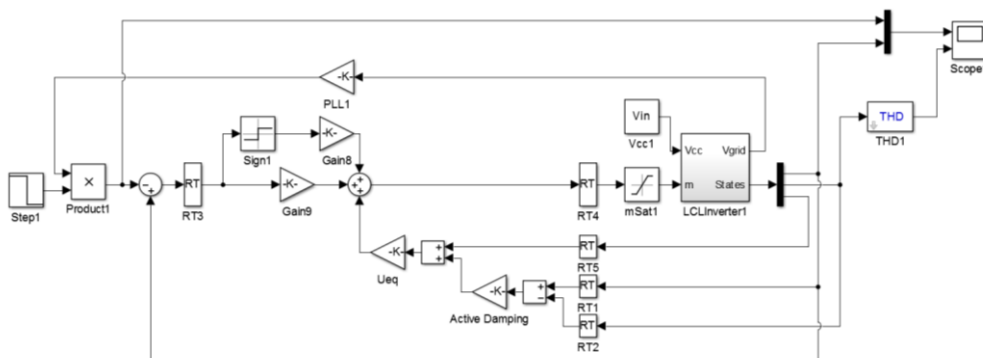
$$m = -\rho \text{sign}(s) - \sigma s + m_{eq}. \quad (5)$$

onde ρ e σ são constantes arbitrárias que influenciam na velocidade de convergência e na magnitude das ondulações em regime permanente. O termo $\text{sign}(s)$ extrai somente o sinal de s a cada momento, podendo resultar em 1 ou -1. O presente trabalho adota os valores de 0,001 para ρ e 0,01 para σ , escolhidos empiricamente por meio de simulações.

O termo contendo a resistência de amortecimento em (4) faz com que o controlador simule a existência deste componente mesmo que este não seja inserido fisicamente no circuito e, pode ser visto como uma técnica de amortecimento ativo (WU, 2016). São obtidos os resultados com a presença e ausência deste termo, para fins de comparação.

O diagrama de blocos para o SMC é ilustrado na Figura 3. A frequência de amostragem do controlador é fixada em 2 vezes a frequência de chaveamento do conversor.

Figura 3 – Diagrama de blocos em Simulink para o SMC.



Resultados e Discussão

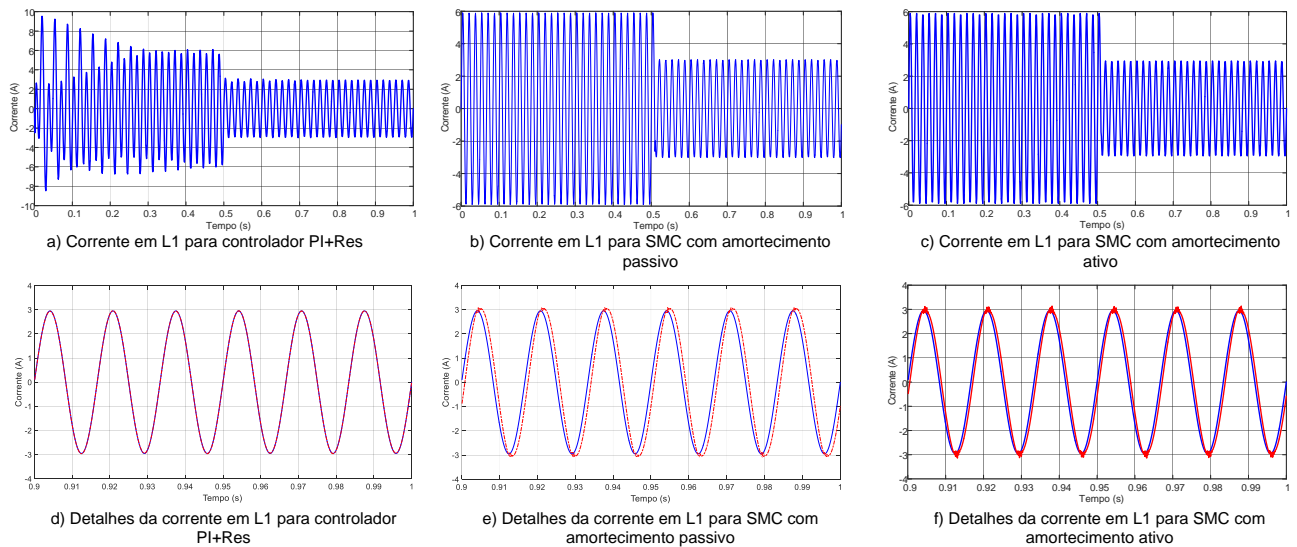
Os resultados de simulações são ilustrados na Figura 4. A referência do pico de corrente nos primeiros 0,5 segundos é o valor nominal de 4,17 A; após este tempo a referência é reduzida à metade.

É visto que o controlador PI+Ressonante apresenta um ótimo rastreamento e baixos ruídos na forma de onda da corrente em regime permanente. Entretanto a dinâmica do controlador é lenta, com um tempo de estabelecimento de aproximadamente 0,4 segundos na ativação e, de 0,1 segundos no degrau de referência.

O SMC por sua vez possui uma dinâmica instantânea, atingindo o regime permanente em menos de um ciclo (16,67 ms) de oscilação da rede com ambas as técnicas de amortecimento. Um pequeno erro de rastreamento pode ser observado, o qual pode ser reduzido pela escolha dos parâmetros do controlador.

Uma análise da DHT mostra que o SMC, mesmo contendo o ruído inerente à sua natureza, injeta pouco conteúdo harmônico na rede de energia. A DHT do controlador PI+Ressonante é de 2% em média, enquanto que o SMC apresenta 1,5% para o caso de amortecimento passivo e 2,5% para o amortecimento ativo.

Figura 4 – Resultados obtidos via simulações.



Conclusões

Este trabalho apresentou uma análise comparativa dos controladores PI+Ressonante e SMC para um sistema monofásico em conectividade à rede de distribuição de energia elétrica.

Sob as condições de simulação estipuladas, ambos os controladores obtiveram bom resultado relativo à distorção harmônica total. Para o SMC a corrente teve um pequeno atraso com relação à referência; estima-se que este atraso se deva à limitação da frequência de amostragem, visto que a velocidade de resposta depende desta variável. Este também é visto como motivo da diferença entre as formas de onda para amortecimento passivo e ativo. Prevê-se que ambas se aproximem cada vez mais, com o aumento do número de amostras por segundo. Adicionalmente, há a possibilidade da formulação em tempo discreto, como em Vieira et al. (2018), visando a implementação em processadores digitais.

Pela facilidade de controle, o foco deste trabalho esteve no controle da corrente em L1, obtendo-se excelentes resultados uma vez que esta é muito próxima da corrente em L2, que é a corrente efetivamente injetada na rede, a menos do *ripple* de corrente, que flui por C₁.

Referências bibliográficas

JALAYATH, S; HANIF, M, Generalized LCL-Filter Design Algorithm for Grid-Connected Voltage Source Inverter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 3, pp 1905 – 1915, Março 2017.

WU, W. et al. Damping Methods for Resonances Caused by LCL-Filter-Based Current-Controlled Grid-Tied Power Inverters: An Overview. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 9, pp 7402 – 7413, Setembro 2017.

SEKHRI, E. Design of a Robust Controller Using Sliding Mode Technique for a Linerar Belt-Driven System. 2017. 64 f., Tese (Mestrado), Tallinn University of Technology, Estonia, Maio 2017.

VIEIRA, R. P. et al. Sliding Mode Controller in a Multiloop Framework for a Grid-Connected VSI With LCL Filter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 6, pp 4714 – 4723, Junho 2018.