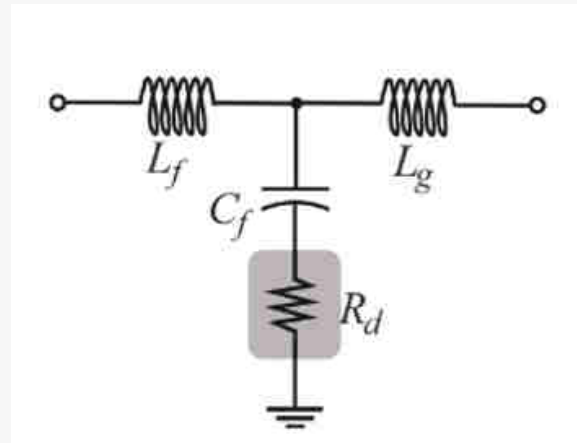
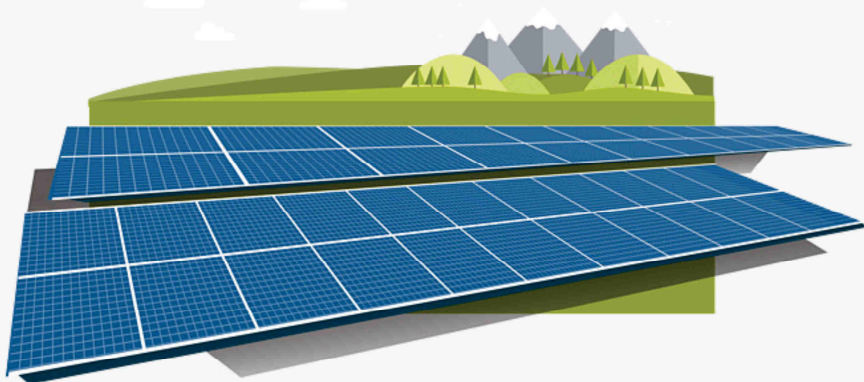


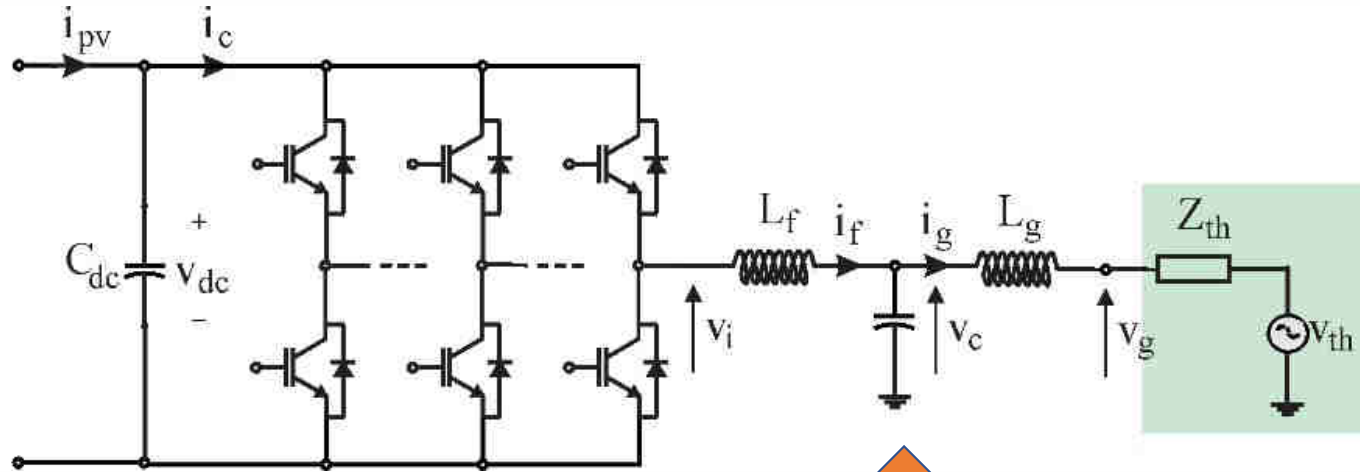
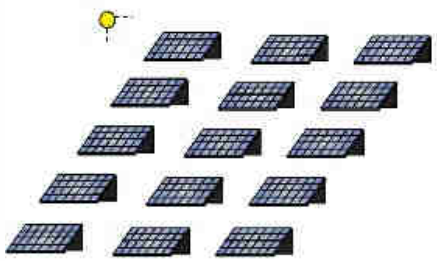
Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

Aula 07 – P1: Filtros LCL e Funções de Transferência do Inversor Fotovoltaico

Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



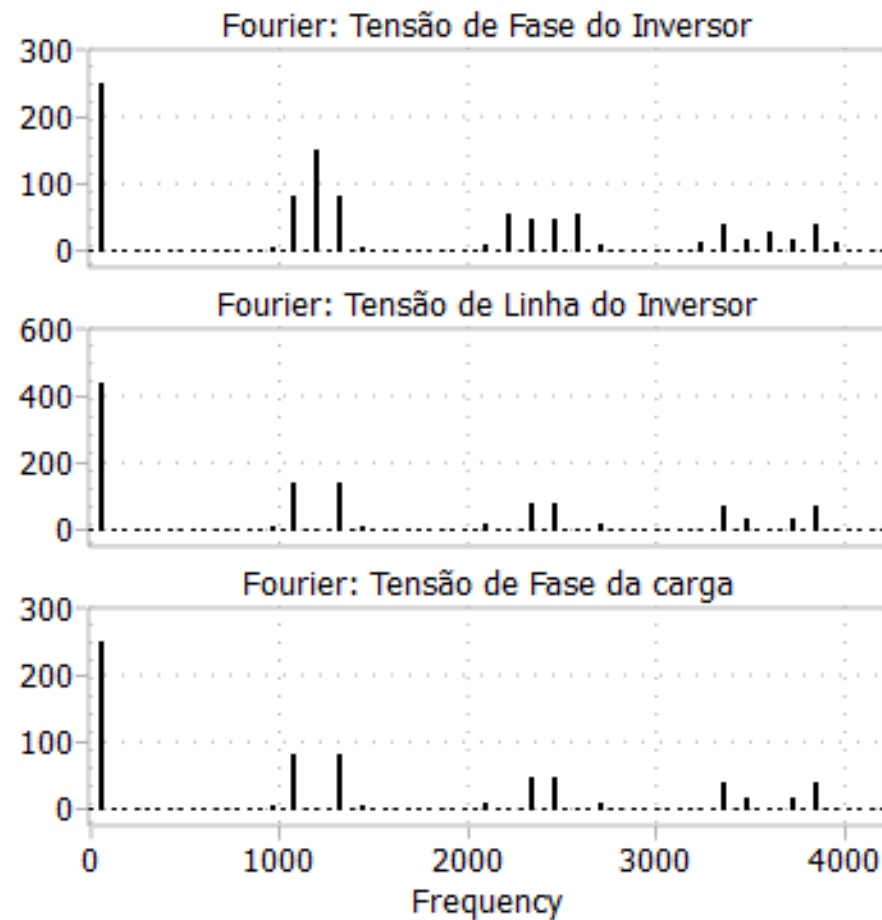
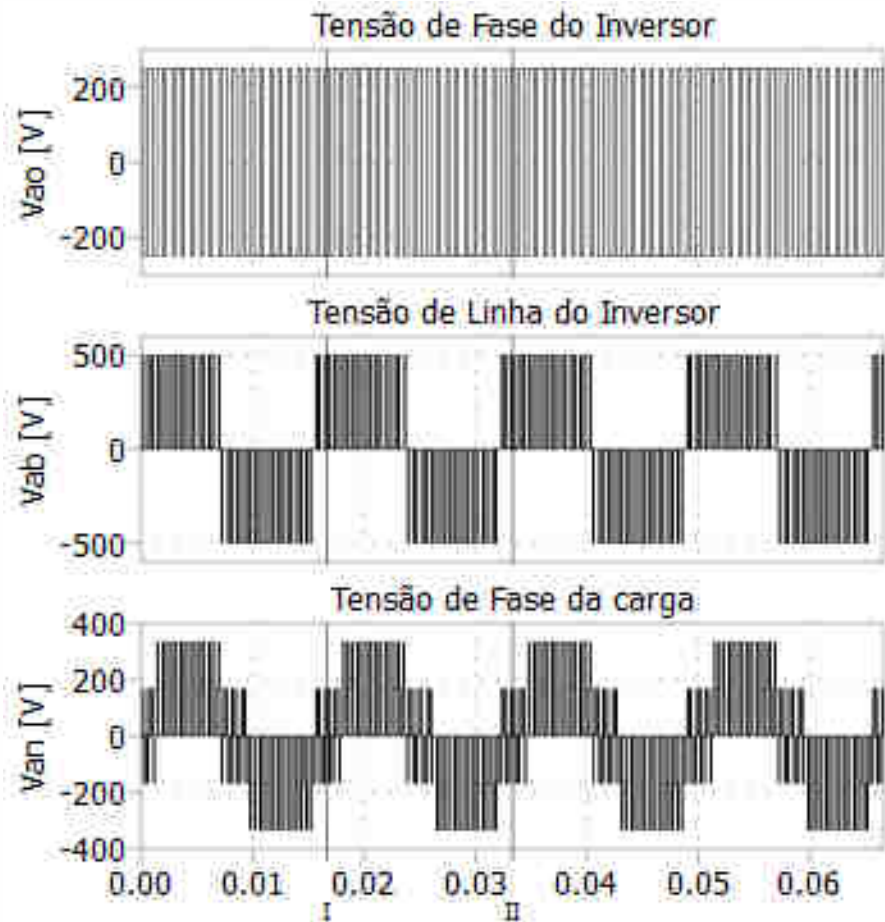
FILTRO LCL



FILTRO LC



FILTRO LCL



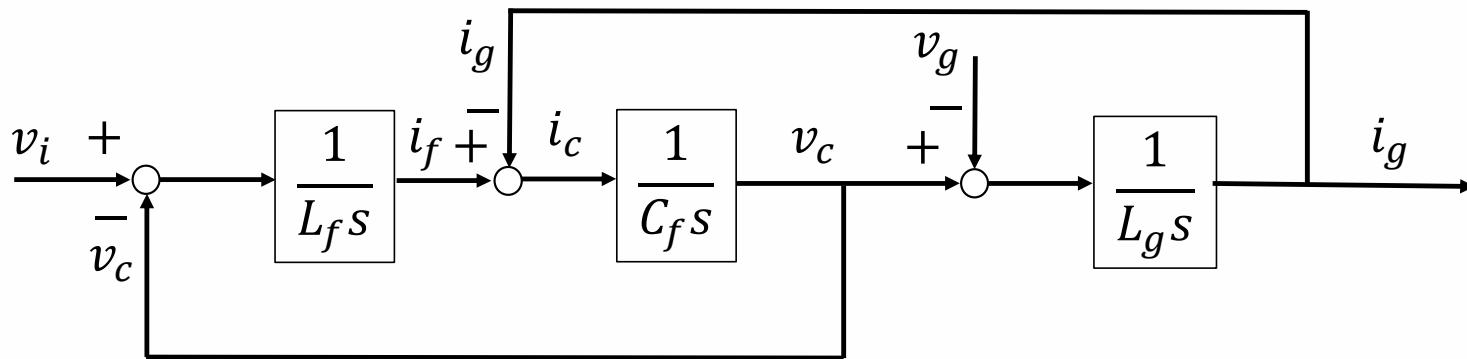
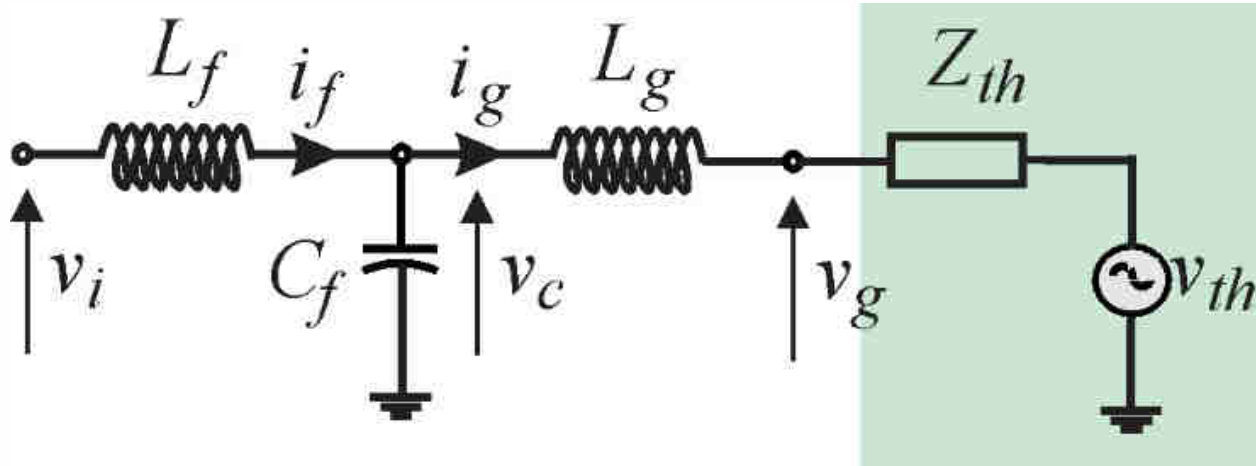
FILTRO PASSIVO: L, LC E LCL

- ✓ Conversores PWM geram harmônicos de tensão.
- ✓ A utilização de um filtro passivo minimiza correntes harmônicas para a rede elétrica.
- ✓ Dentre as topologias apresentadas na literatura, as mais tradicionais são: filtro indutivo (L) indutivos capacitivos (LC) e indutivos-capacitivos-indutivos (LCL).
- ✓ Os filtros L são de primeira ordem, possuindo a atenuação na região de altas frequências de apenas 20 dB/década. Assim são utilizados para aplicações de baixa potência, pois resultam em um indutor muito volumoso.
- ✓ Já os filtros LC são de segunda ordem e tem portanto uma atenuação de 40 dB/década, resultando em um indutor menos volumoso.

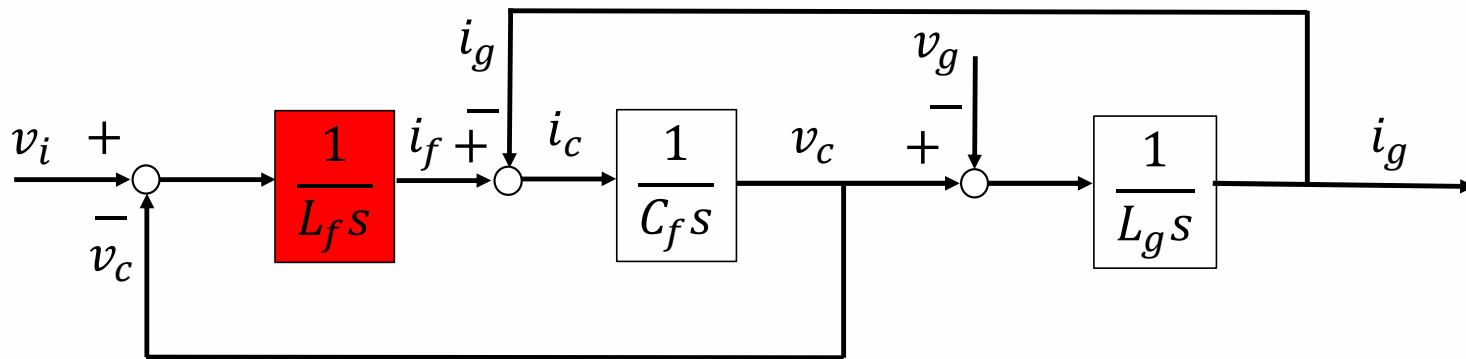
FILTRO PASSIVO: L, LC E LCL

- ✓ No entanto, a conexão direta do capacitor em paralelo com a rede gera transitórios significativos de conexão além de uma frequência de ressonância que tende a instabilizar o controle de corrente quando conectado à rede.
- ✓ Filtro LCL é amplamente utilizado por ter indutores menos volumosos e uma atenuação de 60 dB/década.
- ✓ Além disso, a segunda indutância do filtro reduz os transitórios de conexão.
- ✓ Entretanto, o filtro LCL apresenta também uma frequência de ressonância. Essa deve ser cuidadosamente analisada, visto que tende a instabilizar o controle de corrente do conversor conectado à rede.

Modelagem do filtro LCL



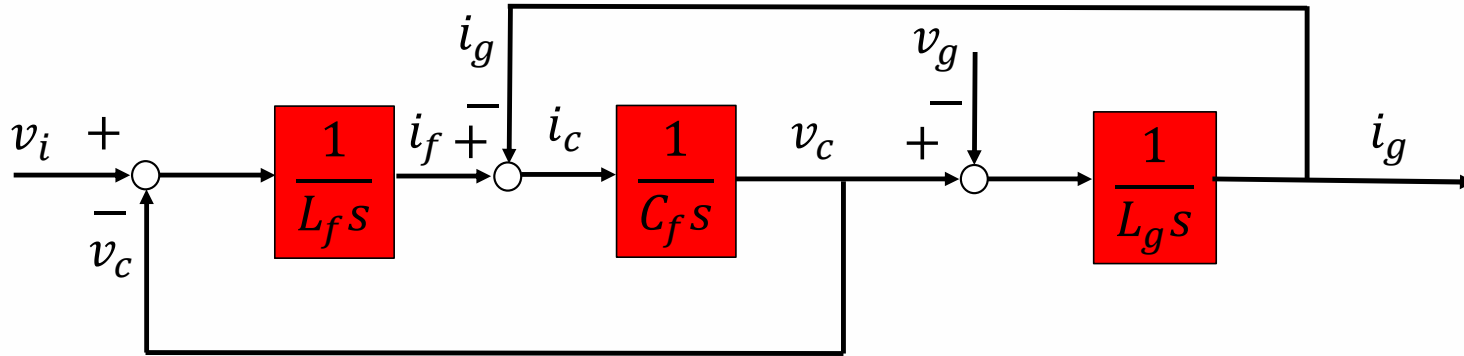
Modelagem do filtro LCL



$$G_{fi}(s) = \frac{I_f(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{L_f s} + \frac{1}{L_f s} \frac{1}{C_f s} \frac{1}{L_g s}}{1 + \frac{1}{L_f s} \frac{1}{C_f s} + \frac{1}{C_f s} \frac{1}{L_g s}} = \frac{\frac{s^2 C_f L_g + 1}{s^3 L_f C_f L_g}}{\frac{s^2 L_f C_f L_g + L_g + L_f}{s^2 L_f C_f L_g}}$$

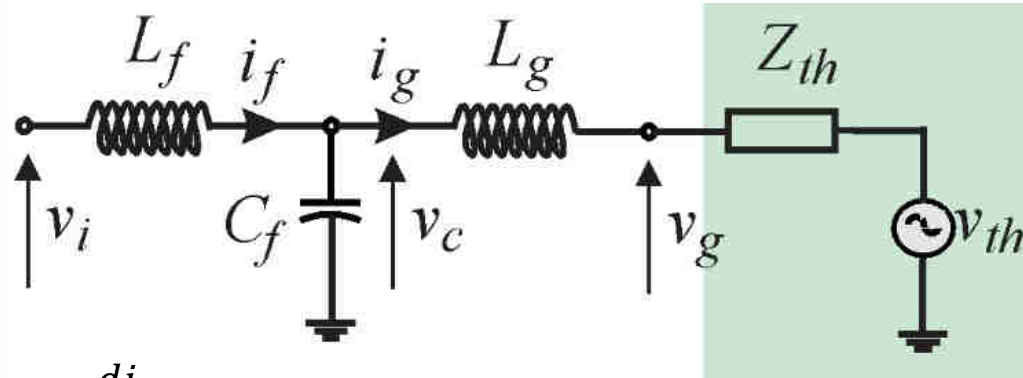
$$G_{fi}(s) = \frac{I_f(s)}{V_i(s)} = \frac{s^2 C_f L_g + 1}{s^3 C_f L_f L_g + s(L_f + L_g)}$$

Modelagem do filtro LCL



$$G_{gi}(s) = \frac{I_g(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{L_f s} \frac{1}{C_f s} \frac{1}{L_g s}}{1 + \frac{1}{L_f s} \frac{1}{C_f s} + \frac{1}{C_f s} \frac{1}{L_g s}} = \frac{1}{s^3 L_g L_f C_f + s(L_f + L_g)}$$

Modelagem do filtro LCL



$$\begin{cases} v_i - v_c = L_f \frac{di_f}{dt} \\ v_c = \frac{1}{C_f} \int i_c dt \\ v_c - v_g = L_g \frac{di_g}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} V_i(s) - V_c(s) = sL_f I_f(s) \\ V_c(s) = \frac{I_c(s)}{sC_f} \\ V_c(s) - V_g(s) = sL_g I_g(s) \end{cases}$$

$$G_{fi}(s) = \frac{I_f(s)}{V_i(s)} = \frac{s^2 C_f L_g + 1}{s^3 C_f L_f L_g + s(L_f + L_g)}$$

$$G_{gi}(s) = \frac{I_g(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{sC_f L_f L_g} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{1}{C_f} \cdot \left(\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_g} \right)}$$

Ressonância do filtro LCL

$$G_{fi}(s) = \frac{I_f(s)}{V_i(s)} = \frac{s^2 C_f L_g + 1}{s^3 C_f L_f L_g + s(L_f + L_g)}$$

$$G_{gi}(s) = \frac{I_g(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^3 L_g L_f C_f + s(L_f + L_g)}$$

- ✓ Note que as funções de transferência que relacionam a tensão da rede e as correntes do filtro apresentam um par de polos complexos conjugados, que caracterizam a frequência de ressonância do mesmo.

$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_f} \cdot \left(\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_g} \right)}$$

Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

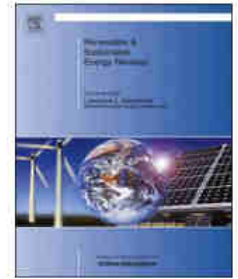
Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 116–135



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Renewable and Sustainable Energy Reviews

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser



Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: An overview

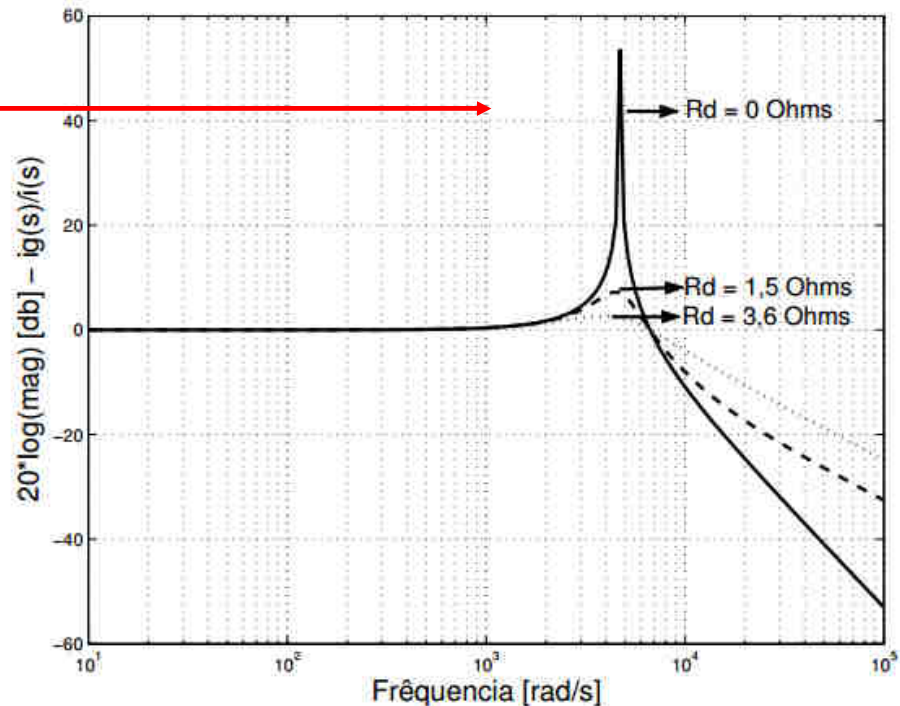
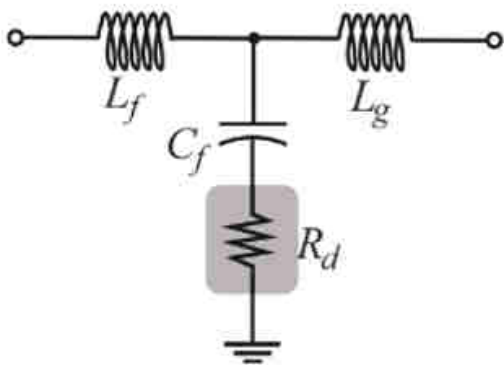
Camilo C. Gomes^a, Allan F. Cupertino^{b,c,*}, Heverton A. Pereira^a

Link na descrição

Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

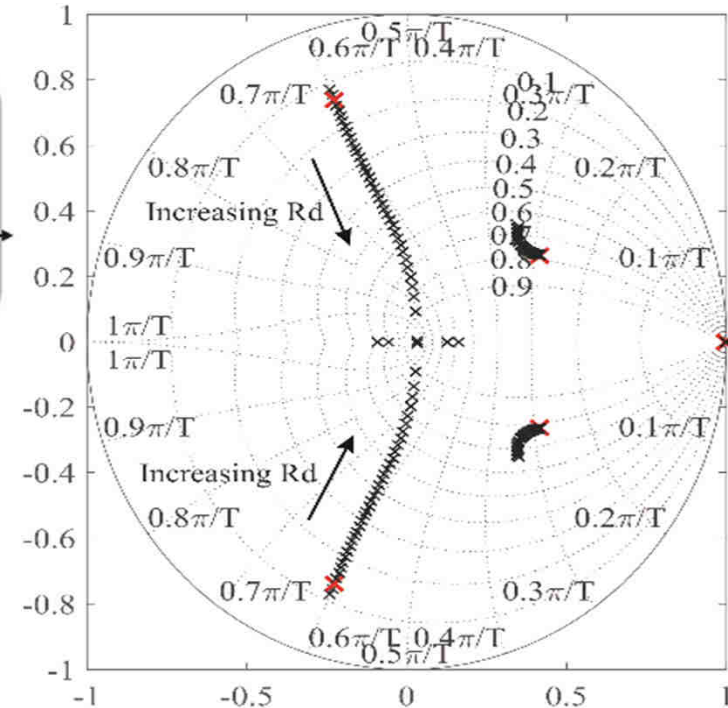
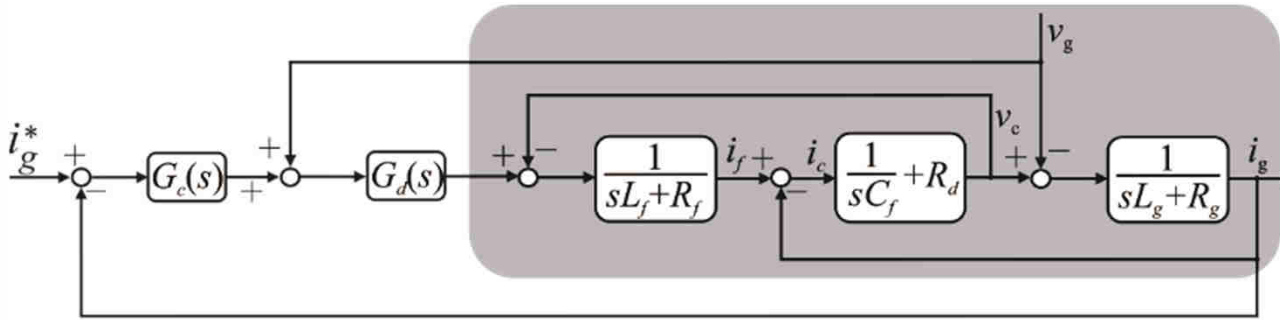
✓ Solução 1: Amortecimento passivo

$$F_{gf} = \frac{I_g(s)}{I_f(s)} = \frac{1}{s^2 C_f L_g + 1}$$



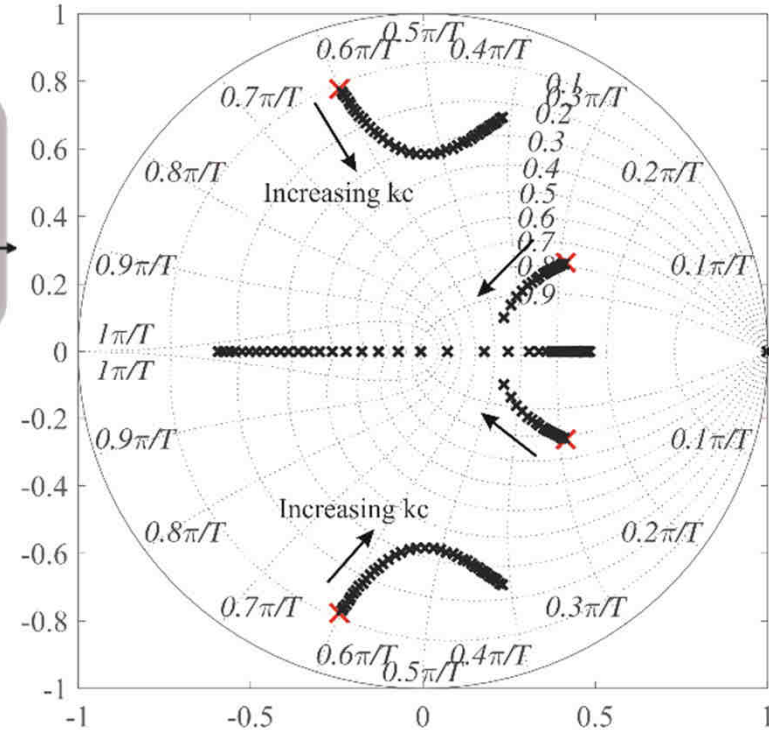
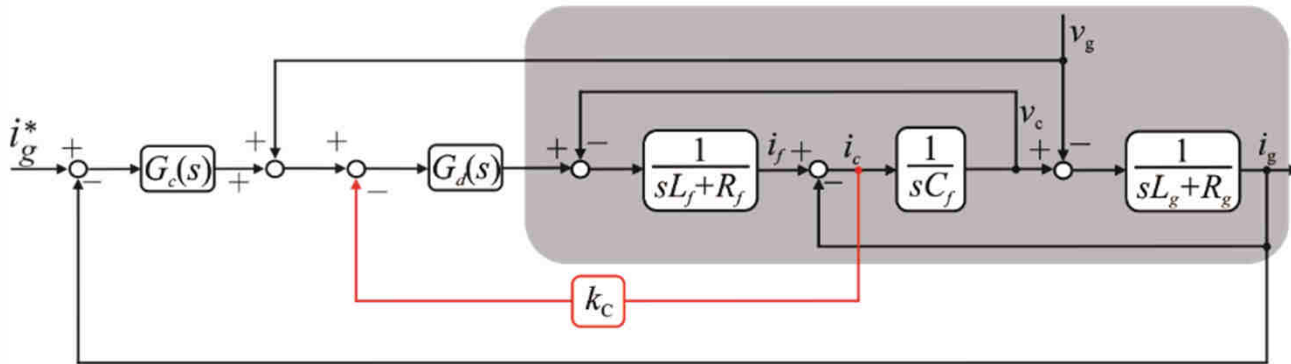
Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

✓ Solução 1: Amortecimento passivo



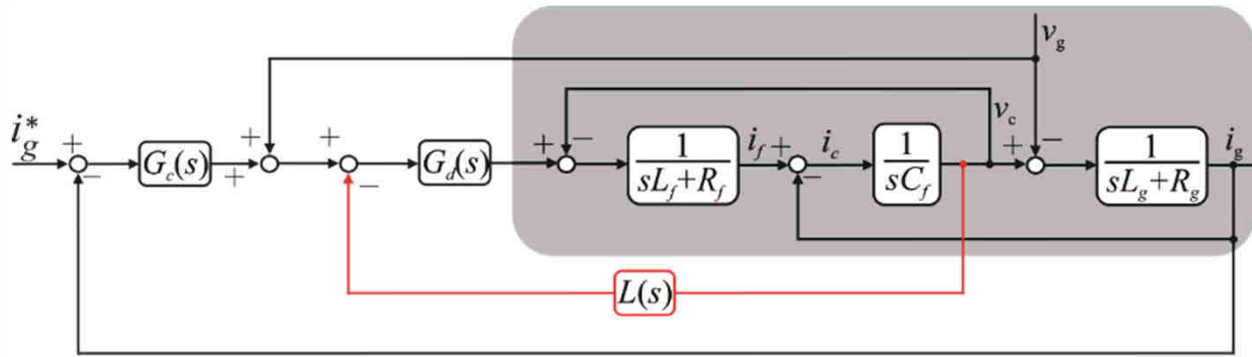
Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

✓ Solução 2: Retroalimentação da corrente do capacitor

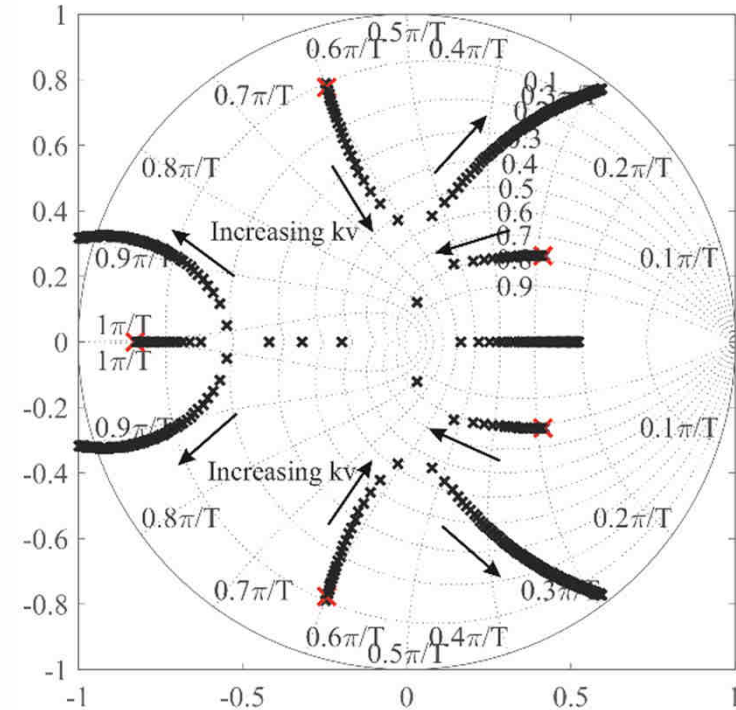


Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

✓ Solução 3: Retroalimentação da tensão do capacitor

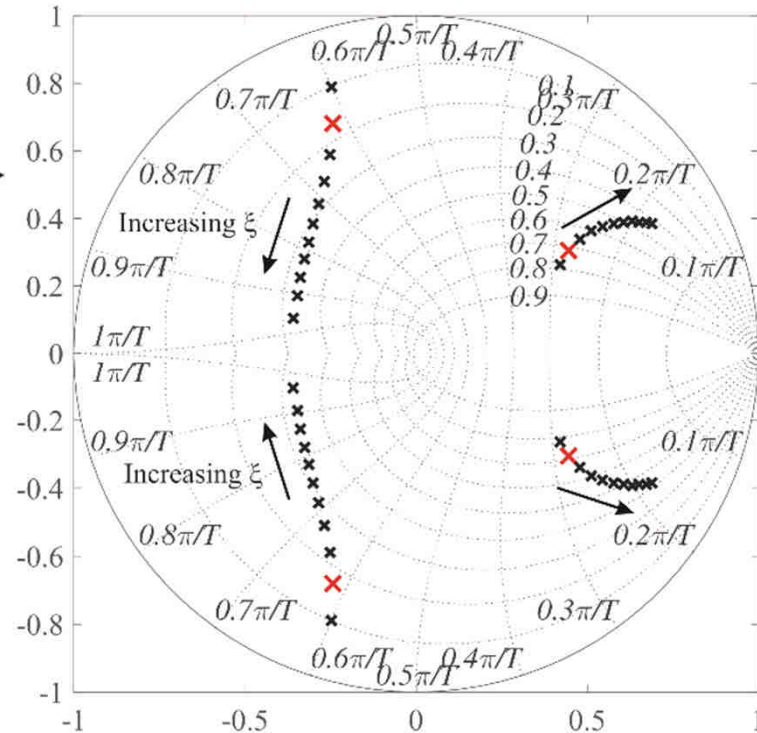
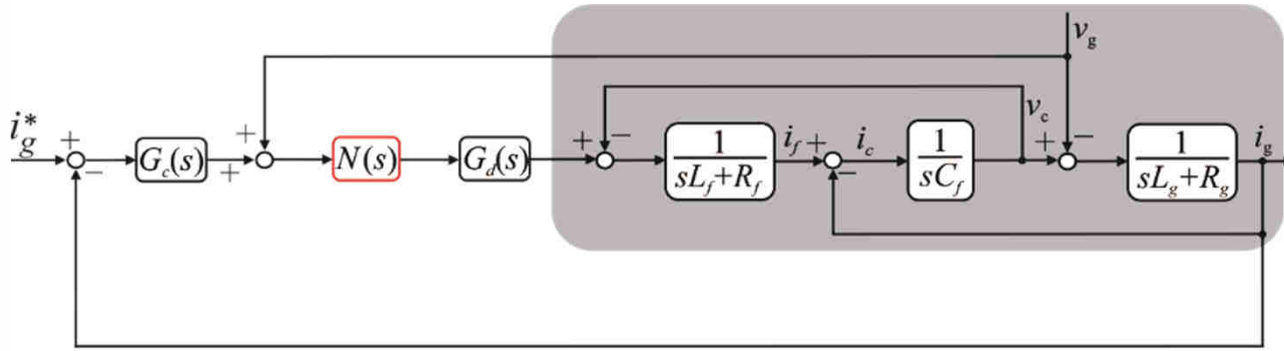


$$L(s) = k_v C_f \omega_{max} \left(\frac{s + k_f \omega_{max}}{k_f s + \omega_{max}} \right)$$



Soluções para minimizar a ressonância do filtro LCL

✓ Solução 4: Filtro Notch



$$N(s) = \left(\frac{s^2 + 2\xi_{nz}\omega_{nf} + \omega_{nf}^2}{s^2 + 2\xi_{np}\omega_{nf} + \omega_{nf}^2} \right)^n \quad N(s)|_{\omega \ll \omega_{nf}} = \left(\frac{1}{\tau s + 1} \right)^n$$

$$\tau = \frac{2(\xi_{np} - \xi_{nz})}{\omega_{nf}} \quad \xi_{nz} = 0$$

Considerando as resistências nos indutores

$$G_{gi}(s) = \frac{1}{s^3 L_g L_f C_f + s^2 C_f (L_f R_g + L_g R_f) + s(L_f + L_g + C_f R_g R_f) + R_f + R_g}$$

$$G_{fi}(s) = \frac{s^2 C_f L_g + s C_f R_g + 1}{s^3 L_g L_f C_f + s^2 C_f (L_f R_g + L_g R_f) + s(L_f + L_g + C_f R_g R_f) + R_f + R_g}$$

$$F_{gf}(s) = \frac{1}{s^2 C_f L_g + s C_f R_g + 1}$$



www.gesep.ufv.br



Gesep



gesep_vicosa



Gesep UFV



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Obrigado!

Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br