

# 光伏并网逆变器LCL滤波器设计

王振存

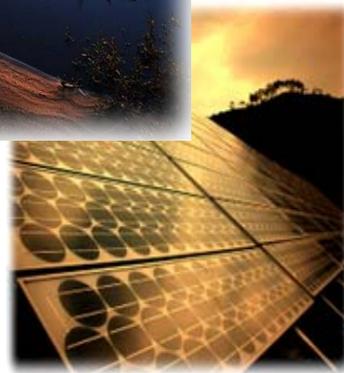
2011.09

新能源

新生活



北京科诺伟业科技有限公司  
Beijing Corona Science & Technology Co.,Ltd.





科诺伟业

# 提纲

- 一、LCL滤波器的作用
- 二、LCL滤波器原理
- 三、LCL滤波器设计约束条件
- 四、LCL滤波参数设计
- 五、LCL滤波器谐振问题及解决

# 一、LCL滤波器的作用

滤波器在并网逆变器中起着重要作用，它将逆变桥产生的开关脉冲电压、电流转变成连续的模拟量。具体作用如下：

- ① 抑制输出电流的过分波动及浪涌冲击；
- ② 滤波作用，将开关动作所产生的高频电流成分滤除；
- ③ 连接电网和逆变桥的媒介、杠杆，通过它可以控制并网电流的幅值和相位，从而实现控制并网逆变器的功率输出，可以实现功率因数等于1，也可以根据需要向电网输送无功功率，甚至实现网侧纯电感、纯电容运行特性；
- ④ 使并网逆变器获得一定的阻尼特性，从而有利于控制系统的设计；
- ⑤ EMC作用。

## 二、LCL滤波器原理

与L滤波器相比，LCL滤波器增加了滤波电感  $L_2$  和滤波电容  $C$ 。其基本原理是  $L_2$  和  $C$  对  $L_1$  电流  $i_1$  含有的高频开关纹波进行阻抗分流，电容  $C$  为高频成分提供低阻通路，这样就有效地减少了电流  $i_2$  (即为电网电流) 的高频含量。

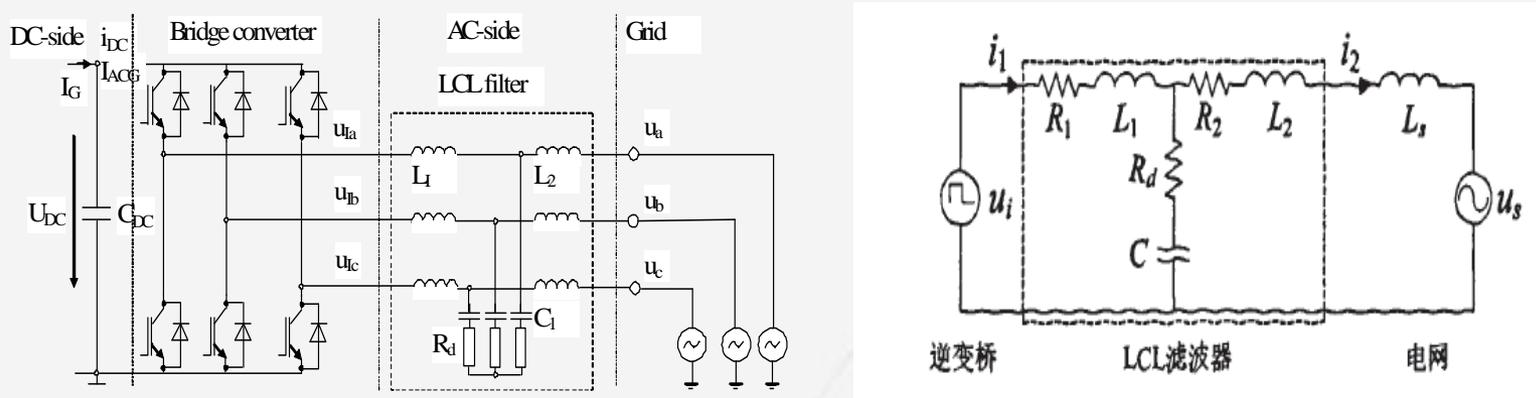


图1 LCL滤波器原理图

## 二、LCL滤波器原理

通常，电感等效电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 较小，为了分析方便可将其忽略

$$G(S) = \frac{R_d C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + R_d (L_1 + L_2) C s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

LCL滤波器具有比单电感滤波更好的性能，能兼顾低频段增益和高频段衰减。与L滤波器相比，LCL滤波器增加了滤波电感和滤波电容 $C$ ，作为三阶系统，LCL滤波器需要确定两个电感量，一个电容量，增加了设计难度。

# 三、LCL滤波器设计约束条件

- 网侧谐波含量要求；

IEEE Std1547-2003 谐波含量标准

谐波次数 (次)	THD	$N < 11$	$11 < N < 17$	$17 < N < 23$	$23 < N < 35$	$N > 35$
允许谐波含量	$< 5\%$	$< 4\%$	$< 2\%$	$< 1.5\%$	$< 0.6\%$	$< 0.3\%$

- 使滤波电感和滤波电容吸收的无功功率尽可能小；
- 满足电流跟踪响应的要求；
- 桥臂侧电流脉动尽可能小；
- 滤波器的谐振频率满足一定的控制要求

# 四、LCL滤波参数设计

## (1) 总电感 (L1+L2) 的约束限制

在基波应用中，对于基波电流，LCL滤波器的滤波电容相当于开路，电路可以简化为图2所示的等效电路，图中的L代表L1和L2的总滤波电感。从稳态条件下并网逆变器输出有功（无功）功率的能力考虑，,并网逆变器LCL的总电感量 (L1+L2) 应予限制。

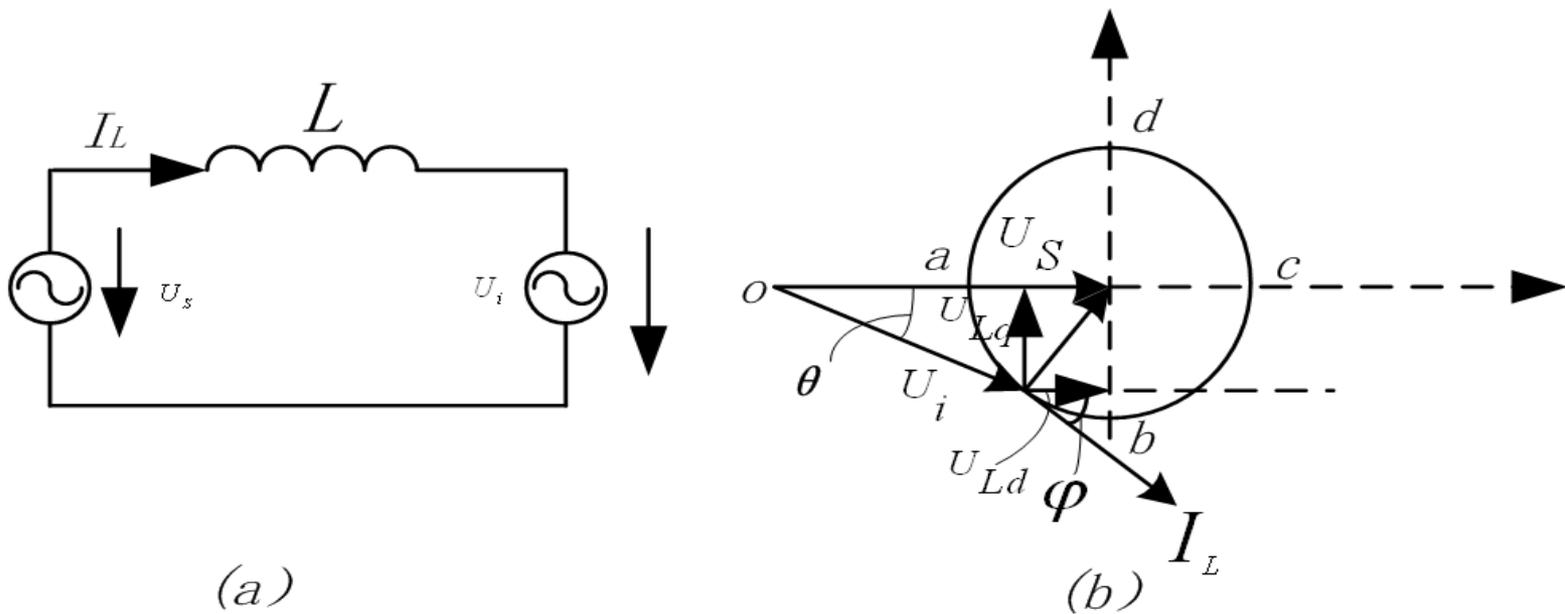


图2 基波应用中的等效电路图及相量图



## 四、LCL滤波参数设计

图2 (b) 中若令 $|U_S|$ 和 $|U_L|$ 为定值, 显然 $U_i$ 处于C点运行时 $|U_i|$ 最大。如果此时 $|U_i|=|U_i|_{\max}$ , 则当并网逆变器运行于其他状态点时, 必有 $|U_i|<|U_i|_{\max}$ 。换言之, 若电感设计满足C点运行条件, 则其必满足4象限任意一点运行条件。

$$\begin{cases} U_{Ld} = U_S - U_i \cos \theta \\ U_{Lq} = U_i \sin \theta \end{cases}$$

$$U_L = \sqrt{U_S^2 + U_i^2 - 2U_S U_i \cos \theta}$$

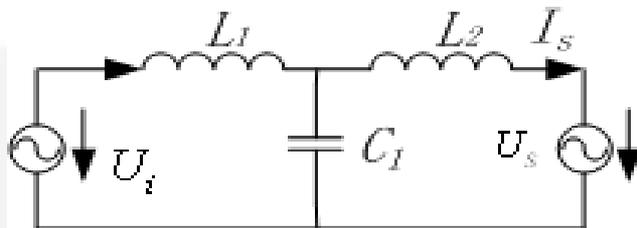
$$L_1 + L_2 \leq \frac{U_{dc} / \sqrt{6} - U_S}{\omega I_{LP}}$$

公式中个变量均为有效值

# 四、LCL滤波参数设计

## (2) 滤波电容C确定

在并网逆变器LCL滤波器设计中，电容产生的无功功率一般限制为不超过5%的系统额定功率。



滤波电容C1流过的电流为：

$$I_{C1} = (U_s + j\omega_n L_2 I_s) * j\omega_n C_1$$

由于： $\omega_n L_2 I_s \leq U_s * 5\% \Rightarrow U_s + j\omega_n L_2 I_s \approx U_s$

$$Q_{C1} = 3U_s^2 * j\omega_n C_1 \leq 5\% P_n;$$

$$\Rightarrow C_1 \leq 5\% \times \frac{P_n}{3U_s^2 * j\omega_n}$$

# 四、LCL滤波参数设计

## (3) LCL滤波器桥臂侧电感L的设计

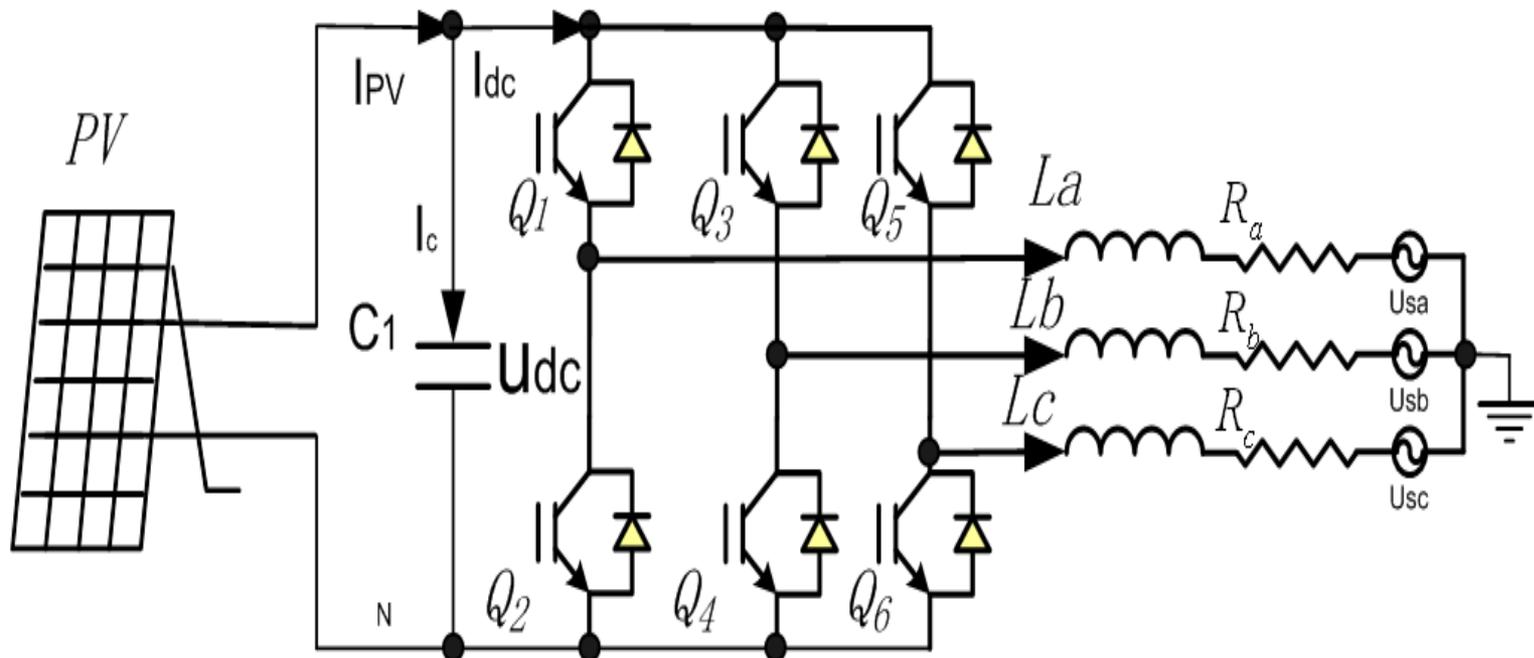
通常开关频率至少为基波频率的40倍以上，那么电容  $Z_{C1} \leq \frac{1}{40\omega_n C_1}$ ，  
即桥臂电流纹波大部分均流经电容，因此桥臂电流纹波主要由桥臂侧电感来抑制。桥臂侧电感参数主要由桥臂侧电流纹波含量要求来设计。

实际上，并网逆变器桥臂侧的电感电流是随开关周期而脉动的，为满足设计要求，需要分析并网逆变器桥臂侧电流纹波在一个工频周期的最大值，进而能通过电感值的设计将并网逆变器桥臂侧的电流纹波幅值限制在一定范围之内。

# 四、LCL滤波参数设计



科诺伟业



# 四、LCL滤波参数设计

逆变桥臂开关通、断时的回路方程为：

上桥臂开通时：
$$L_k \frac{\Delta i_k}{\Delta t} = u_{dc} - u_{sk} - \frac{u_{dc}}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k$$

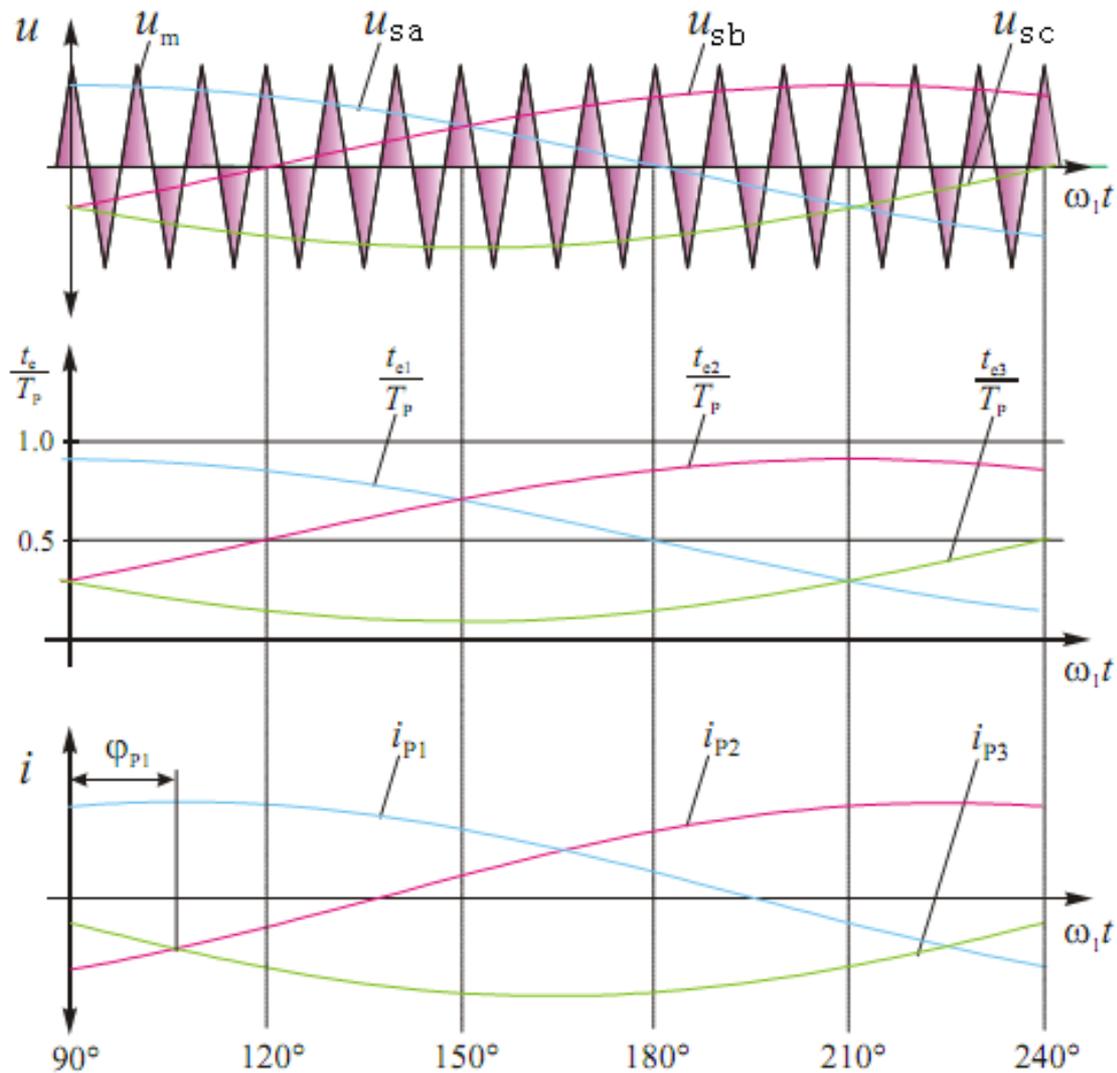
上桥臂关断时：
$$L_k \frac{\Delta i_k}{\Delta t} = -u_{sk} - \frac{u_{dc}}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k$$

$$k = a, b, c$$

由于对称性，只需分析三相并网逆变器60度的运行情况，其他工作时候的工况就均可由其推出。为此我们以a相区间（ $90^\circ \sim 150^\circ$ ）来考察分析：根据SPWM调制原理可知：



科诺伟业



新能源新生活



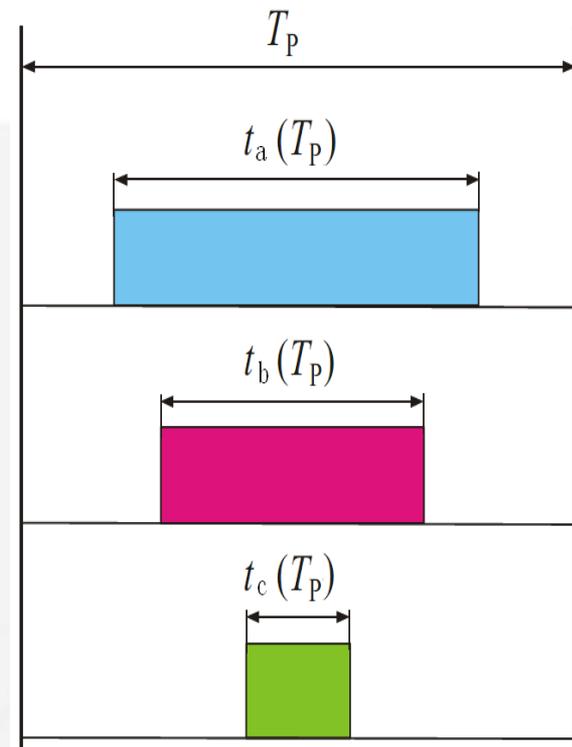
科诺伟业

## 四、LCL滤波参数设计

$$\frac{t_a(t)}{T_p} = \frac{1}{2} [1 + m^* \sin(\omega t + \theta)]$$

$$\frac{t_b(t)}{T_p} = \frac{1}{2} [1 + m^* \sin(\omega t + \theta - 120^\circ)]$$

$$\frac{t_c(t)}{T_p} = \frac{1}{2} [1 + m^* \sin(\omega t + \theta + 120^\circ)]$$



# 四、LCL滤波参数设计

上桥臂开通时: 
$$L_a \frac{\Delta i_a}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{2u_{dc}}{3} - u_{sa} \dots\dots\dots (t_a - t_b) \\ \frac{u_{dc}}{3} - u_{sa} \dots\dots\dots (t_b - t_c) \\ -u_{sa} \dots\dots\dots (t_c) \end{cases}$$

上桥臂关断时: 
$$L_a \frac{\Delta i_a}{\Delta t} = -u_{sa} \dots (T_p - t_a)$$

当  $\frac{u_{dc}}{3} - u_{sa} < 0 \Rightarrow \frac{u_{dc}}{3} - \frac{u_{dc}}{2} * m * \sin(\omega t) < 0 \Rightarrow m > \frac{2}{3 \sin(\omega t)}$  时:

$$\begin{aligned} \Delta i_a &= \frac{\left( \frac{2u_{dc}}{3} - u_{sa} \right) * (t_a(t) - t_b(t))}{L_k} * T_p \\ &= \frac{\left( \frac{2u_{dc}}{3} - u_{sa} \right) * \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos(\omega t - 60^\circ)}{L_k} * T_p \dots\dots\dots (90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ) \end{aligned}$$



# 四、LCL滤波参数设计

当  $\frac{u_{dc}}{3} - u_{sa} < 0 \Rightarrow \frac{u_{dc}}{3} - \frac{u_{dc}}{2} * m * \sin(\omega t) > 0 \Rightarrow m < \frac{2}{3\sin(\omega t)}$  时:

$$\Delta i_a = \frac{\left(\frac{2u_{dc}}{3} - u_{sa}\right) * (t_a(t) - t_b(t)) + \left(\frac{u_{dc}}{3} - u_{sa}\right) * (t_b(t) - t_c(t))}{L_k} * T_p$$

$$= \frac{\frac{u_{dc}}{3} [2t_a(t) - t_b(t) - t_c(t)] - u_{sa} [t_a(t) - t_c(t)]}{L_k} \dots\dots\dots (90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ)$$

$$= \frac{m \frac{u_{dc}}{4} \sin(\omega t) [2 + \sqrt{3}m * \cos(\omega t + 60^\circ)]}{L_k} * T_p$$

上桥臂开通时:

$$L_b \frac{\Delta i_b}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{u_{dc}}{3} - u_{sb} \dots\dots\dots (t_b - t_c) \\ -u_{sb} \dots\dots\dots (t_c) \end{cases}$$

上桥臂关断时:

$$L_b \frac{\Delta i_b}{\Delta t} = \begin{cases} -u_{sb} \dots\dots (T_p - t_a) \\ -\frac{1}{3}u_{dc} - u_{sb} \dots\dots (t_a - t_b) \end{cases}$$

# 四、LCL滤波参数设计

$$\Delta i_b = \frac{\left(\frac{u_{dc}}{3} - u_{sb}\right) * (t_b(t) - t_c(t))}{L_k} * T_p$$

$$= \frac{\left(\frac{u_{dc}}{3} - u \sin(\omega t - 120^\circ)\right) * \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} m \cos(\omega t)\right]}{L_k} * T_p \dots\dots\dots (90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ)$$

⇒

$$\Delta i_a = \frac{\left(\frac{u_{dc}}{3} - m * u_{dc} \sin(\omega t)\right) * \left[\frac{\sqrt{3}}{2} m \cos(\omega t - 60^\circ)\right]}{L_k} * T_p \dots\dots\dots (-30^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ)$$

$$\Delta i_a = \begin{cases} \frac{\left(\frac{u_{dc}}{3} - m * u_{dc} \sin(\omega t)\right) * \left[\frac{\sqrt{3}}{2} m \cos(\omega t - 60^\circ)\right]}{L_k} * T_p \dots\dots\dots (-30^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ) \\ \frac{\left(\frac{2u_{dc}}{3} - u_{sa}\right) * \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos(\omega t - 60^\circ)}{L_k} * T_p \dots\dots\dots \left(m > \frac{2}{3\sin(\omega t)}\right) \dots\dots\dots (90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ) \\ \frac{m \frac{u_{dc}}{4} \sin(\omega t) \left[2 + \sqrt{3} m * \cos(\omega t + 60^\circ)\right]}{L_k} * T_p \dots\dots\dots \left(m < \frac{2}{3\sin(\omega t)}\right) \end{cases}$$



# 四、LCL滤波参数设计

在电网电压过  
零点处:

$$\Delta i_a = \frac{m \frac{u_{dc}}{3} * \frac{\sqrt{3}}{4}}{L_k} = \frac{m * u_{dc}}{4\sqrt{3}L_k} * T_p \dots\dots\dots (\omega t = 0^\circ)$$

在电网电压峰  
值处:

$$\Delta i_a = \begin{cases} \frac{\left(\frac{2u_{dc}}{3} - \frac{m \cdot u_{dc}}{2}\right) * \frac{3}{4} m}{L_k} * T_p \dots\dots \left(m > \frac{2}{3\sin(\omega t)}\right) \\ \frac{m \frac{u_{dc}}{4} * \left(2 - \frac{3}{2} m\right)}{L_k} \dots\dots\dots \left(m < \frac{2}{3\sin(\omega t)}\right) * T_p \end{cases} \dots (\omega t = 90^\circ)$$

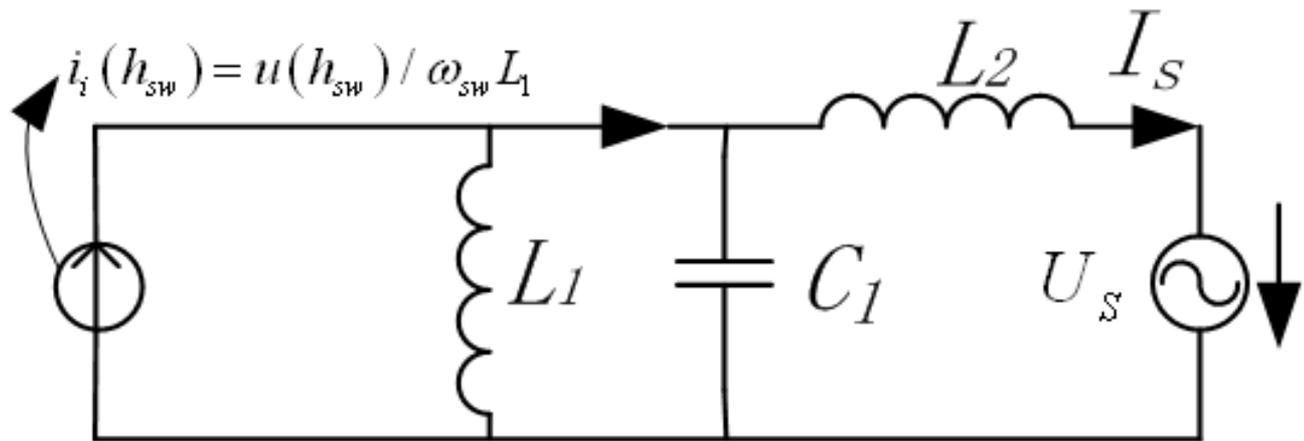
电流纹波最大为:

$$\frac{u_{dc}}{4\sqrt{3}L} * T_p \Rightarrow L \geq \frac{u_{dc}}{4\sqrt{3}\Delta i_{\max}} * T_p$$

# 四、LCL滤波参数设计

## (4) 两个电感比值确定

图为 $h$ 次开关频率谐波电流下的等效单相LCL滤波器结构，在高频逆变状态，并网逆变器是一个谐波发生器，网侧相当于短路。由诺顿定理可知，并网逆变器桥臂侧可以用一个电流源与电感 $L_1$ 并联等效，电流源  $i_i(h_{sw}) = u(h_{sw}) / \omega_{sw} L_1$



## 四、LCL滤波参数设计

$$\frac{i_S(h_{sw})}{i_i(h_{sw})} = \frac{G_{L2}}{G_{L1} + G_{C1} + G_{L2}} = \left| \frac{1/j\omega_{sw}L_2}{1/j\omega_{sw}L_1 + j\omega_{sw}C_1 + 1/j\omega_{sw}L_2} \right|$$

$$= \left| \frac{1/L_2C_1}{\frac{L_1 + L_2}{L_1L_2C_1} - \omega_{sw}^2} \right| = \frac{z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|}$$

其中， $z_{LC}^2 = [L_2C_1]^{-1}$ ， $\omega_{res}^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1L_2C_1}$ ， $\omega_{sw}^2 = (2\pi f_{sw})^2$ ， $f_{sw}$  是开关频率，

$h_{sw} = \omega_{sw} / \omega_{\pi}$  是开关谐波次数。

首先令  $r = \frac{L_2}{L_1}$ ，则  $L_T = L_1 + L_2 = (1+r)L_1$ ，然后根据 LCL 滤波器的谐振频率公式推导出：

出：

# 四、LCL滤波参数设计

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(1+r)}{r L_1 C_1}}$$

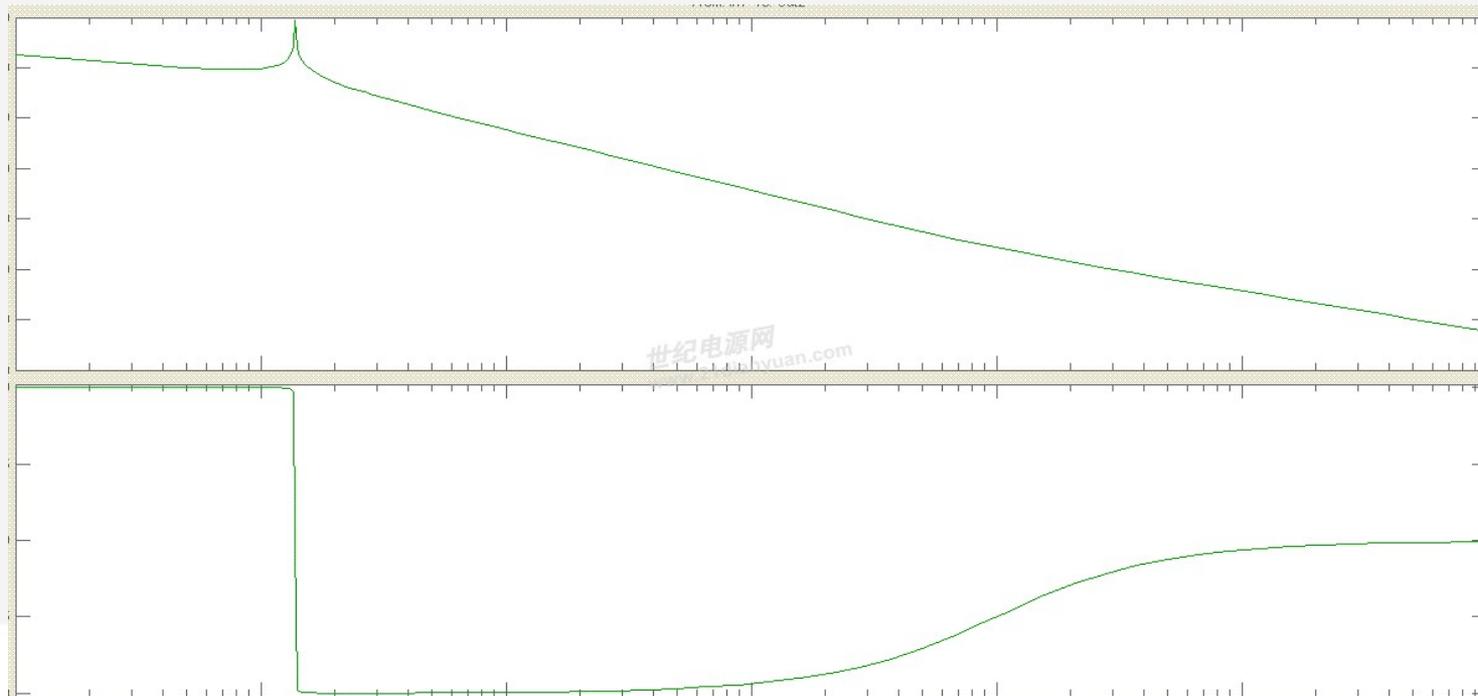
$$\frac{i_S(h_{sw})}{i_i(h_{sw})} = d = \frac{1/r L_1 C_1}{\omega_{sw}^2 - \frac{1+r}{r L_1 C_1}} = \frac{1}{r(L_1 C_1 \omega_{sw}^2 - 1) - 1} \Rightarrow dr(L_1 C_1 \omega_{sw}^2 - 1) - d - 1 = 0$$

$$\Rightarrow r = \frac{1+d}{d(L_1 C_1 \omega_{sw}^2 - 1)}$$

# 五、LCL滤波器谐振问题及解决

由于电容支路的增加，使得并网逆变器由一阶系统变为了三阶系统，从而增加了控制系统设计的困难。LCL滤波器最严重的问题是其谐振问题

当 $L_1=150\mu\text{H}$ ， $L_2=80\mu\text{H}$ ， $C=100\mu\text{F}$ ， $R_d=1\text{m}\Omega$ 时其波特图如下



# 五、LCL滤波器谐振问题及解决

为了抑制LCL滤波器的谐振特性，首先，要求其滤波器的谐振频率设计在10倍基频和0.5倍开关频率之间，既有

$$10f_n \leq f_{res} \leq 0.5f_{sw}$$

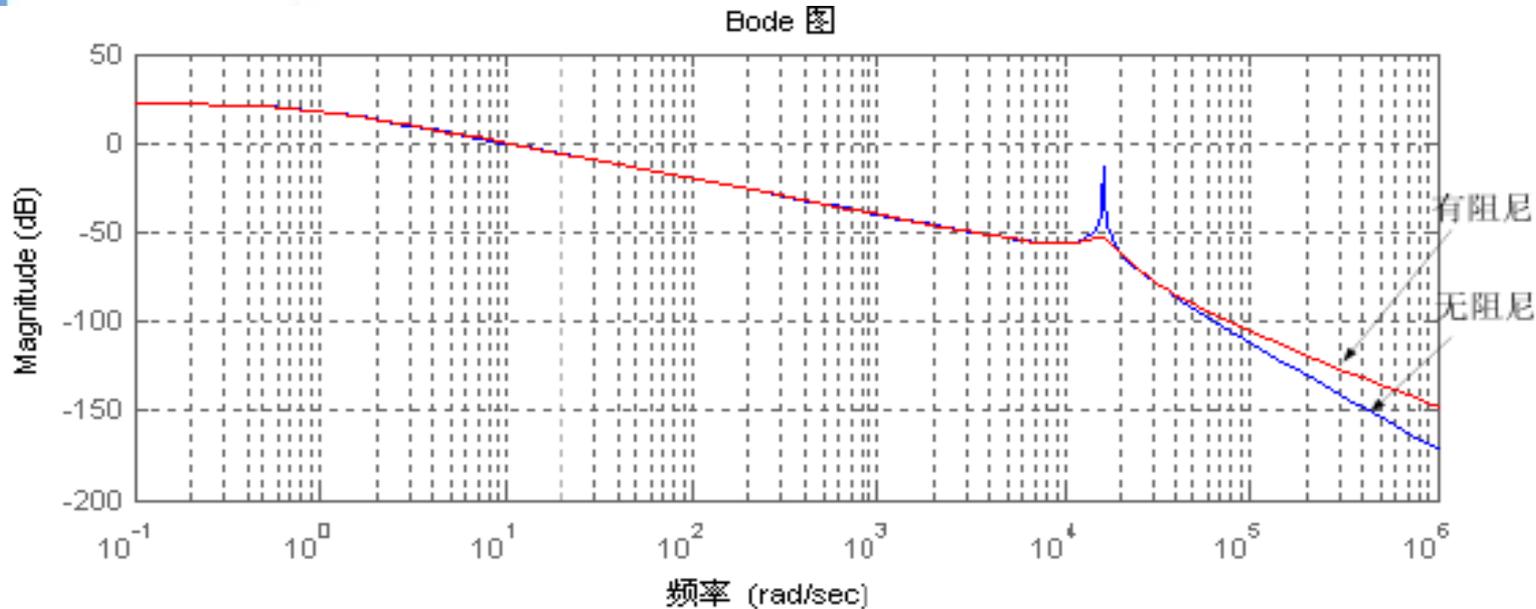
式中  $f_n$  —— 电网基频；

$f_{sw}$  —— 并网逆变器调制的开关频率；

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}}$$

# 五、LCL滤波器谐振问题及解决

无源阻尼法：即在滤波回路中串入阻尼电阻



- 加入阻尼起到了抑制谐振作用,一般取  $R_d = \frac{1}{3} \frac{1}{\omega_{res} C_1}$  , 就能很好的抑制谐振。
- 阻尼电阻引起的损耗为:

$$P_{loss} = 3R_d \sum_{h=1}^{\infty} \left[ i_i(h) - i_s(h) \right]^2$$

# 五、LCL滤波器谐振问题及解决



科诺伟业

**有源阻尼法：**无需阻尼电阻，通过改变控制器结构使系统稳定的“主动阻尼”技术(Active Damping, AD)。

**主要思想：**当原系统Bode图出现正谐振峰值时，利用算法产生一个负谐振峰值与之叠加，从而抵消和抑制原系统Bode图的正谐振峰，以此增加系统阻尼。

## 主要缺陷：

- ①需要增加电压、电流传感器；
- ②实际产品电感、电容的非线性，而使谐振频率变化，谐振点发生偏移，不容易做到准确抵消谐振峰值；
- ③诸如基于遗传算法等控制系统结构相对复杂，在工业上还难以得到应用；
- ④现有技术条件下，控制系统带宽的局限性，在控制响应上并不能完全等效无源阻尼。



科诺伟业

感谢您的支持!

新能源新生活