

高阶无源滤波器对比分析

吕志鹏¹, 吴 鸣¹, 宋振浩¹, 赵 婷¹, 杜 刚²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:利用回路电流法推导了现有的 LCL、LLCL、LCCL、LLCCL、L(LCL)₂ 型滤波器逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数。对于这 5 种高阶无源滤波器, 在幅频域下, 从谐波抑制效果和谐振特性两方面分别进行深入研究。利用 R_d 和 R_d-C_d 阻尼法对高阶滤波器可能存在的谐振点进行谐振抑制, 针对含有双并联谐振支路的高阶无源滤波器进行不同支路阻尼效果对比分析, 并确定最佳阻尼支路。通过仿真对理论分析的正确性进行验证, 表明 L(LCL)₂ 型滤波器谐波抑制效果最佳, 同时可以缩小器件尺寸并降低器件的成本造价。

关键词:无源滤波器; 谐波抑制; 谐振抑制; 开关频率; 电能质量

中图分类号: TN 713

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.008

0 引言

近年来, 以风力发电、光伏发电为代表的新能源发电在我国迅猛发展。新能源发电的并网渗透率逐步增加, 大量电力电子装置投入电网运行。而电力电子装置工作时会产生大量谐波, 对电网的电能质量产生负面影响, 并对电网安全、稳定运行造成巨大的冲击^[1-2]。滤波器作为连接新能源发电与电网之间的枢纽, 其性能优劣对于提高新能源发电并网渗透率、改善电网电能质量具有极其重要的作用。滤波器主要分为有源滤波器 (APF) 和无源滤波器 (PF) 2 种。有源滤波器是具有动态滤波效果的电力电子装置, 可以不改变原有电网的拓扑结构。与无源滤波器相比, 有源滤波器的谐波治理效果更佳^[3-4], 但由于其控制系统复杂, 一旦控制系统出现故障, 将对电网造成重大影响, 且其造价成本较高, 故实际应用中无源滤波器被广泛用于治理谐波, 以改善电网电能质量^[5]。

文献[6]分析了 LCL 型滤波器的拓扑结构及其外部特性, 采用无源阻尼法进行谐振抑制, 并利用基波的有功、无功损耗及谐波的有功损耗对 LCL 型滤波器进行参数优化。文献[7]基于 LCL 型无源滤波器的拓扑结构, 给出电网侧电流到逆变器侧电压的传递函数, 在幅频域对其谐波抑制特性进行详尽分析, 并利用电容电流反馈有源阻尼法来抑制滤波器可能存在的谐振。文献[8-10]对 LLCL 型滤波器进行研究, 与 LCL 型滤波器相比, LLCL 型滤波器在开

关频率处具有更佳的谐波抑制效果, 但在高于开关频率时, LLCL 型滤波器的谐波衰减率小于 LCL 型滤波器的谐波衰减率, 此时 LLCL 型滤波器的谐波治理效果不如 LCL 型滤波器。文献[11]基于 LCL 型滤波器, 在电网侧电感处并联小电容, 提出一种 LCCL 型滤波器, 在参数取值适当的情况下, LCCL 型滤波器与 LLCL 型滤波器具有相同的谐波抑制特性; LLCL 型滤波器在开关频率处具有“陷波”作用, 而 LCL 型滤波器在大于开关频率时具有更高的谐波衰减率。结合 2 种滤波器的谐波抑制效果, 文献[12]提出一种新型 LLCCL 型滤波器, 该滤波器具有 LCL、LLCL 2 种滤波器的优点, 同时, 该滤波器额外引入一个可能的谐振点, 该谐振点在高于开关频率处, 若滤波器参数取值不当, 则对其谐波抑制效果产生巨大影响。文献[13]在 LLCL 型滤波器的基础上提出一种 L(LCL)₂ 型滤波器, 该滤波器省去了电网侧电感, 而增加了一条并联支路 L_f-C_f , 可以减小滤波器件的体积并降低成本, 该滤波器与 LLCL 型滤波器相比, 在二倍开关频率处额外增加了“陷波”作用, 进一步提高了滤波器的滤波性能, 同时该滤波器亦引入额外的可能谐振点。

上述众多专家学者分别提出了不同高阶无源滤波器的拓扑结构, 但是不同滤波器之间谐波抑制性能优劣的对比分析尚未涉及。本文分别从滤波器体积大小、成本造价、谐波抑制及谐振抑制等方面分析了不同滤波器之间谐波治理性能的优劣。采用 R_d 和 R_d-C_d 阻尼法分析了不同滤波器的谐振抑制特性, 针对含有 2 条并联谐振支路的 LLCCL、L(LCL)₂ 型滤波器, 分别对不同支路阻尼效果进行对比分析, 进而筛选最佳阻尼支路, 以尽可能降低无源阻尼对滤波器谐波抑制性能的影响。利用 R_d-C_d 阻尼法对无源滤波器进行谐振抑制, 搭建各高阶无源滤波器仿真模型, 并通过实例仿真验证了理论分析的正确性。

1 高阶无源滤波器拓扑结构

如图 1 所示, 新能源发电经逆变器、滤波器后在

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877201); 国家电网公司科技项目 (以电为核心多能互补集成功率变换装备关键技术及实证研究)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51877201) and the Science and Technology Project of SGCC (the Key Technology and Demonstration Research of Integrated Power Conversion Equipment with Multi-energy Complementation)

公共连接点(PCC)接入电网。其中逆变器的主要作用是将新能源发出的直流电变成与电网电压频率、相位、幅值一致的交流电,逆变器侧电流主要成分为基波、与基波相关的谐波、开关频率处谐波及二倍开关频率处的高次谐波,其余高次谐波占比较低,一般可以忽略不计。而逆变器与 PCC 之间的滤波器是治理谐波的重要器件。

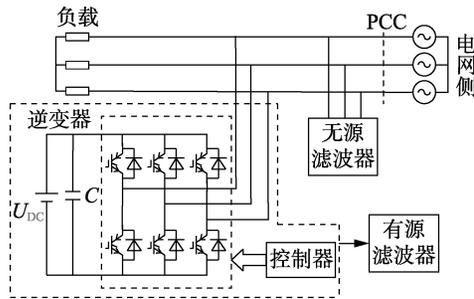


图 1 滤波器的运行原理

Fig.1 Operation principle of filter

图 1 中的无源滤波器与有源滤波器均是并联接入电网。其中,有源滤波器与逆变器的主电路拓扑基本相同,只是在控制原理与功能上略有区别。因此一般多采用多功能逆变器,即可实现逆变器与有源滤波器二者的功能,进而节约成本。有源滤波器在消除谐波污染、提高电能质量方面与无源滤波技术相比有着无可比拟的优势。但有源滤波器的控制程序复杂,造价是无源滤波器的 3 倍以上,且技术相对不太成熟,维护成本高。相较之下,无源滤波器造价较低,技术更为成熟,安装后基本免维护。因此无源滤波装置是目前应用最为广泛的谐波抑制手段。

1.1 LCL、LLCL 型滤波器

LCL、LLCL 型滤波器拓扑结构分别如图 2(a)、(b)所示。图中, U_i 、 L_1 分别为逆变器侧输入电压与电感; U_g 、 L_2 分别为电网侧电压与电感; C_f 、 L_f 分别为高频衰减支路电容与电感。

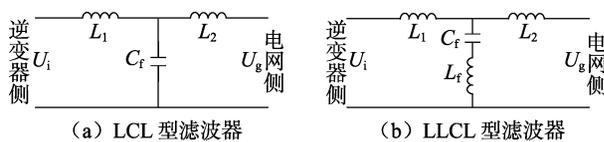


图 2 LCL、LLCL 型滤波器的拓扑结构

Fig.2 Topologies of LCL and LLCL filters

LCL、LLCL 型滤波器中逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数如式(1)所示^[14-15]。

$$\begin{cases} G_{LCL}(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ G_{LLCL}(s) = \frac{1}{(L_1 L_2 + L_1 L_f + L_2 L_f) C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ f_{r-LCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}}, f_{s-LLCL} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \\ f_{r-LLCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{(L_1 L_2 + L_1 L_f + L_2 L_f) C_f}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $G_{LCL}(s)$ 、 $G_{LLCL}(s)$ 分别为 LCL、LLCL 型滤波器的传递函数; f_{r-LCL} 、 f_{r-LLCL} 分别为 LCL、LLCL 型滤波器固有的谐振频率; f_{s-LLCL} 为 LLCL 型滤波器的开关频率。

为了便于分析不同滤波器的特性差异,采用文献[16]中 LLCL 与 L(LLCL)₂ 型滤波器参数设计结果中的最优参数,其中逆变器的开关频率设定为 1.26×10^5 rad/s (20 kHz)。而 LCL、LCCL、LLCCL 型滤波器的参数设置,依据它们与 LLCL 型滤波器拓扑结构之间的联系进行计算而获得。依据表 1 中各参数取值,可以得到 LCL、LLCL 型滤波器幅频域的 Bode 图如图 3 所示。

表 1 LCL、LLCL 型滤波器的参数值

Table 1 Parameter values of LCL and LLCL filters

滤波器	L_1 /mH	L_2 /mH	C_f /μF	L_f /μH
LCL 型	4.2	1.2	2	—
LLCL 型	4.2	1.2	2	31.67

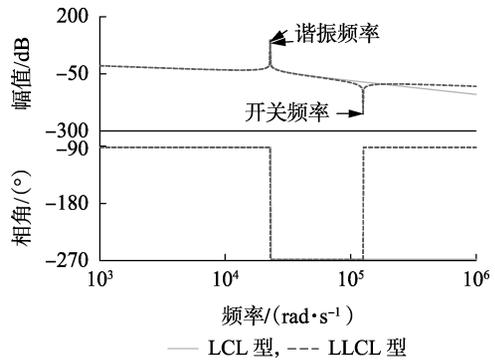


图 3 LCL、LLCL 型滤波器的 Bode 图

Fig.3 Bode diagrams of LCL and LLCL filters

如图 3 所示,在开关频率处 LLCL 型滤波器具有“陷波”功能,可以更好地抑制开关频率处的高次谐波;在高于开关频率情况下,LCL 型滤波器的谐波衰减率为每 10 倍频 60 dB,而 LLCL 型滤波器的谐波衰减率为每 10 倍频 20 dB,LLCL 型滤波器的谐波抑制效果比 LCL 型滤波器的差。在低于开关频率情况下,LLCL 型滤波器性能优于 LCL 型滤波器,而高于开关频率情况下,LLCL 型滤波器性能比 LCL 型滤波器的差。正常情况下,电力系统中高频谐波占比较低,一般可以忽略不计,故 LLCL 型滤波器较 LCL 型滤波器的整体谐波抑制效果更佳。由表 1 可知,LLCL 型滤波器相比 LCL 型滤波器增加了支路滤波电感 L_f ,但 L_f 取值较小,对于滤波器尺寸、造价的影响不大。在 LLCL 型与 LCL 型滤波器滤波效果一定的情况下,LLCL 型滤波器可以减少电感投入,缩小滤波器体积,并降低成本造价。

1.2 LCCL 型滤波器

LLCL 型滤波器是利用串联谐振原理,使电容支路阻抗在开关频率处为 0,以滤除开关频率处的纹

波电流。同时,可以利用并联谐振原理,使电网侧电感支路在开关频率处呈现无穷大状态,进而提出了 LCCL 型滤波器如图 4 所示。

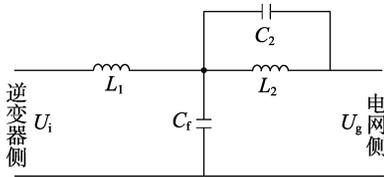


图 4 LCCL 型滤波器的拓扑结构

Fig.4 Topology of LCCL filter

基于 LCCL 型滤波器的拓扑结构,可以得到其逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数,如式(2)所示^[17]。

$$G_{\text{LCCL}}(s) = \frac{1 + L_2 C_2 s^2}{(C_f + C_2) L_1 L_2 s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (2)$$

依据表 2 中 LCCL 型滤波器各参数值,可以得到其在幅频域 Bode 图如图 5 所示。

表 2 LCCL 型滤波器的参数值

Table 2 Parameter values of LCCL filter

滤波器	L_1/mH	L_2/mH	$C_f/\mu\text{F}$	$C_2/\mu\text{H}$
LCCL 型	4.2	1.2	2	0.053

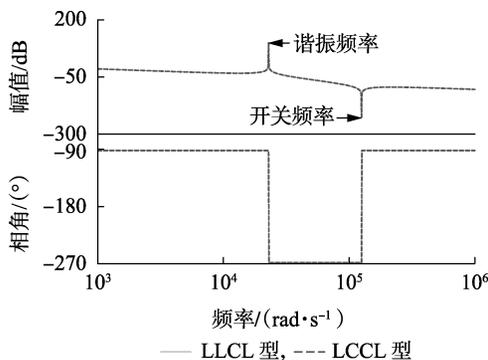


图 5 LCCL 型滤波器的 Bode 图

Fig.5 Bode diagram of LCCL filter

由图 5 可以看出,LCCL 与 LLCL 型滤波器具有相同的幅频特性,故在谐波治理方面 LCCL 型滤波器具备 LLCL 型滤波器的所有优点及缺陷。换言之,LCCL 与 LLCL 型滤波器仅仅是具有相同谐波抑制特性的 2 种不同拓扑结构,只要参数取值适当,2 种滤波器在性能方面并无差异。同时在滤波器尺寸大小、成本造价及滤波效果等方面并未有所提升。

1.3 LLCCL 型滤波器

LLCL 型滤波器在开关频率处具有“陷波”功能,在低于开关频率时,LLCL 型滤波器较 LCL 型滤波器的谐波治理效果更好;在高于开关频率时,LLCL 型滤波器的谐波衰减率小于 LCL 型滤波器,故 LLCL 型滤波器的滤波效果不如 LCL 型滤波器。为了保证滤波器无论是在低频还是在高频都具备较

高的性能,一种融合 LCL、LLCL 滤波器优点的新型 LLCCL 型滤波器被提出,如图 6 所示,该滤波器可以看成是 LCL 型滤波器与 LLCL 型滤波器的组合。

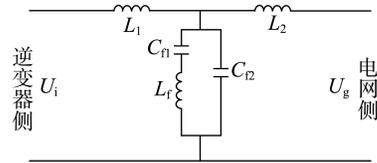


图 6 LLCCL 型滤波器的拓扑结构

Fig.6 Topology of LLCCL filter

基于 LLCCL 型滤波器的拓扑结构,可以得到其逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数^[18],见附录 A 中式(A1)。

依据表 3 给出的 LLCCL 型滤波器各参数取值,可以得到其在幅频域下的 Bode 图如图 7 所示。

表 3 LLCCL 型滤波器的参数值

Table 3 Parameter values of LLCCL filter

滤波器	L_1/mH	L_2/mH	$C_n/\mu\text{F}$	$C_{n2}/\mu\text{F}$	$L_f/\mu\text{H}$
LLCCL 型	4.2	1.2	1	1	63.34

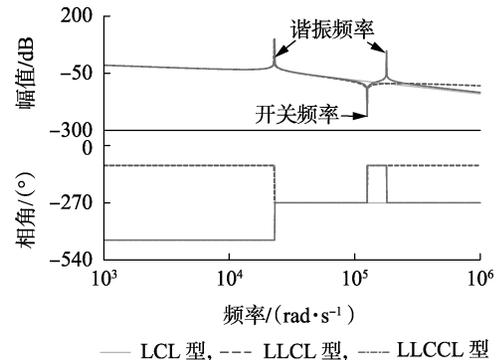


图 7 LLCCL 型滤波器的 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of LLCCL filter

如图 7 所示,在开关频率处 LLCCL 型滤波器具有与 LLCL 型滤波器相同的“陷波”功能,在高于开关频率时,LLCCL 型滤波器与 LCL 型滤波器的谐波衰减率同为每 10 倍频 60 dB。故 LLCCL 型滤波器是集 LCL、LLCL 型滤波器优点于一身的新型滤波器。同时 LLCCL 型滤波器在高频处引入了一个可能谐振点,若滤波器参数取值不当,导致该谐振点在二倍开关频率处,将会对谐波抑制效果产生巨大的负面影响。因此 LLCCL 型滤波器参数设计及谐振阻尼需着重考虑新引入的高频谐振点的影响。

1.4 L(LCL)₂ 型滤波器

为抑制高频谐波,提升滤波器谐波抑制性能,在 LLCL 滤波器的基础上,省去电网侧电感,将逆变器侧电感分为三部分,并额外增加谐振支路,提出了一种改进的高阶 L(LCL)₂ 型滤波器。如图 8 所示,图中 $L_{11} + L_{12} + L_{13} = L_1$, $C_{n1} + C_{n2} = C_f$, 与 LLCL 型滤波器相比, L(LCL)₂ 型滤波器节省总电感,从而减小滤波器

的尺寸。虽然增加了并联谐振支路,但并联支路的电容总量未发生变化,因此额定负载下容性无功功率将保持稳定。

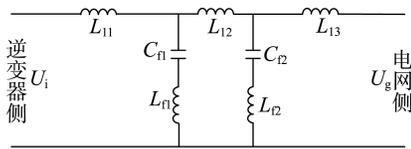
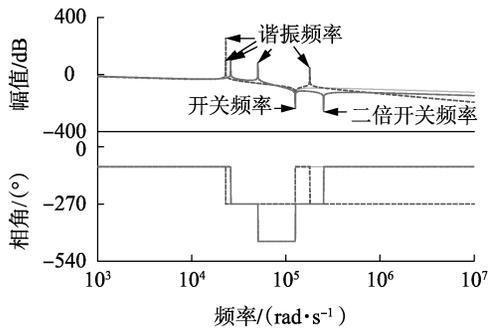


图 8 L(LCL)₂ 型滤波器的拓扑结构

Fig.8 Topology of L(LCL)₂ filter

文献[16]给出了 L(LCL)₂ 型滤波器的拓扑结构,并从参数设计、稳定性方面进行全面分析。但文中所给出的 L(LCL)₂ 型滤波器逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数略有不足,不仅在变量设定方面存在歧义,且利用该传递函数不能得到正确的幅频分析图。因此本文利用回路电流法,对 L(LCL)₂ 型滤波器逆变器侧电压到电网侧电流的传递函数进行求解,并得到传递函数,见附录 A 中式(A2)。

L(LCL)₂ 型滤波器的各参数取值见附录 A 中表 A1,依据表中各参数取值,可以得到其在幅频域下的 Bode 图如图 9 所示。



— LLCL 型, --- LLCCL 型, - - - L(LCL)₂ 型

图 9 L(LCL)₂ 型滤波器的 Bode 图

Fig.9 Bode diagram of L(LCL)₂ filter

由图 9 中可看出, L(LCL)₂ 型滤波器与 LLCL、LLCCL 型滤波器相比,额外引入一个可能谐振点,但该可能谐振点距离开关频率、二倍开关频率较远,并不会对开关频率及二倍开关频率处的“陷波”效果产生过多影响;在二倍开关频率处增加了一个“陷波”,增强谐波抑制效果;同时,还会减小滤波器尺寸,降低滤波器的造价。

2 谐振抑制的无源阻尼法

为了抑制高阶滤波器的谐振,可以采用有源阻尼或无源阻尼法对滤波器的可能谐振点进行阻尼抑制。有源阻尼法不改变电网的拓扑结构,且不产生额外的功率损耗,但有源滤波器中传感器成本较高且有源阻尼法的控制策略比较复杂。无源阻尼结构简单、成本较低,适用于传统的刚性电网中,但无源阻尼法会产生一定功率损耗。实际应用中,综合考

虑 2 种阻尼法的成本与性能,无源阻尼法更受青睐。

无源阻尼法主要是在滤波网络中串入或并入电阻、电容、电感等无源器件以提高滤波系统阻尼,抑制滤波网络的谐波谐振。如图 10 所示,依据串入或并入无源器件的位置不同,可以分为并联支路阻抗串联或并联接入无源器件,逆变器侧电感串联或并联接入无源器件,电网侧电感串联或并联接入无源器件这 6 种不同的无源阻尼方法。图中, Z_f 为不同滤波器的并联谐振支路电容电感的组合形式; $Z_{d1} \sim Z_{d6}$ 表示在 L_1 、 L_2 和并联谐振支路进行串并联阻尼,可以是电阻、电容和电感的不同组合形式。

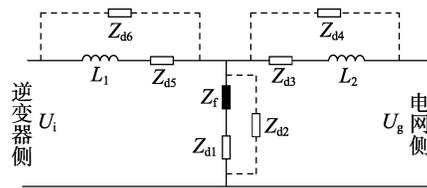


图 10 阻尼法位置分类

Fig.10 Damping method with different positions

一般情况下,并联谐振支路串联或并联无源器件的综合效果更佳,因此实际应用中谐振抑制的无源阻尼法多为在并联谐振支路接入无源器件。按照接入的无源器件的组合不同可以分为 R_d 、 R_d-C_d 、串联 $R_dL_dC_d$ 、并联 $R_dL_dC_d$ 4 类。

如图 11(a)所示,因其设计和实现简单,造价成本低,在并联支路串联电阻是最常用的无源阻尼解决方案之一。但 R_d 阻尼法会产生功率损耗,尤其是降低高频谐波衰减率,且电阻 R_d 的值越大,高频谐波衰减率的值越小,即 R_d 阻尼法的谐振效果与滤波器谐波抑制效果互相制约。

由于 R_d 阻尼法的缺点,图 11(b)给出了一种改进 R_d-C_d 阻尼解决方案。该滤波器的主要优点是不影响滤波器的谐波衰减率。此外,通过适当选择分相电容比,可以降低电阻中的功率损耗。

图 11(c)、11(d)中串联 $R_dL_dC_d$ 阻尼法和并联 $R_dL_dC_d$ 阻尼法是在 R_d-C_d 阻尼法的基础上,为了减少无源阻尼法的功率损耗,将电感与电阻并联接入阻尼电路。其中并联 $R_dL_dC_d$ 阻尼法较串联 $R_dL_dC_d$

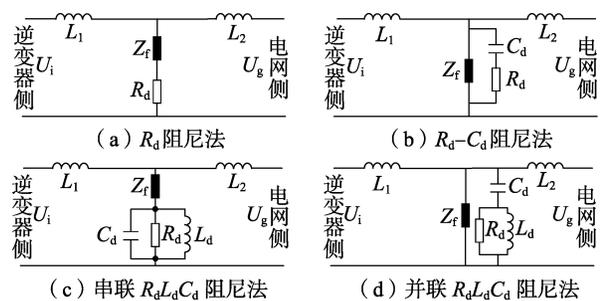


图 11 不同 R_d 、 L_d 、 C_d 组合阻尼方法

Fig.11 Damping method with different combinations of R_d 、 L_d and C_d

阻尼法可以更好地降低阻尼功率损耗^[19]。串、并联 $R_d L_d C_d$ 阻尼法对 LCL 型滤波器具有较好的改善效果,但对于 LLCCL 与 $L(LCL)_2$ 型滤波器的改善效果并不明显。同时该阻尼法会引入新的谐振点,改变原有滤波器的谐波抑制特性。

实际应用中,综合考虑不同阻尼法的阻尼效果、成本造价、复杂程度等多方面因素, R_d-C_d 阻尼法在谐振抑制中获得了广泛应用。

2.1 LCL 型滤波器无源阻尼分析

LCL 型滤波器 R_d 和 R_d-C_d 阻尼方法的拓扑结构见附录 A 中图 A1。 R_d-C_d 阻尼法中,一般取 $C_d = C_f$,可使滤波器处于最佳阻尼效果。LCL 型滤波器 R_d 阻尼法的 Bode 图见附录 A 中图 A2(a)。由图可知,随着 R_d 取值的增加, R_d 阻尼法的谐振抑制效果增强,同时高频谐波衰减率降低,因此 LCL 型滤波器 R_d 阻尼法下的谐振抑制与高频谐波衰减率互相冲突。LLCL 型滤波器 R_d-C_d 阻尼法的 Bode 图见附录 A 中图 A2(b)。由图可知,随着 R_d 取值的增加, R_d-C_d 阻尼法的谐振抑制效果增强,并且高频谐波衰减率并未随 R_d 取值的改变而变化,始终维持在每 10 倍频 60 dB。LCL 型滤波器 R_d 与 R_d-C_d 阻尼法对比分析 Bode 图见附录 A 中图 A2(c)。由图可知,在 R_d 取值相同的情况下,相比 R_d-C_d 阻尼法, R_d 阻尼法具有更好的谐振抑制效果,但高频谐波衰减率较低。

2.2 LLCL 型滤波器无源阻尼分析

LLCL 型滤波器不同阻尼方法的拓扑结构见附录 A 中图 A3。LLCL 型滤波器的 R_d 阻尼法 Bode 图、 R_d-C_d 阻尼法 Bode 图、 R_d 与 R_d-C_d 阻尼法对比 Bode 图分别见附录 A 中图 A4(a)~(c)。由图可知,LLCL 型滤波器高频谐波衰减率的取值并不随着 R_d 取值的变化或阻尼方法的不同而改变,始终维持在每 10 倍频 20 dB。随着 R_d 取值的增加,谐振抑制效果增强,同时谐波抑制的“陷波”效果减弱。

2.3 LCCL 型滤波器无源阻尼分析

LCCL 型滤波器不同阻尼方法的拓扑结构见附录 A 中图 A5。由于 LCCL 与 LLCL 型滤波器在不同阻尼方法下具有相同的谐振抑制效果,因此不再针对 LCCL 型滤波器的谐振抑制幅频特性进行过多分析。

2.4 LLCCL 型滤波器无源阻尼分析

由于 LLCCL 型滤波器具有 2 条并联谐振支路,在不同谐振支路进行阻尼会对其滤波效果产生不同的影响。通过 LLCCL 型滤波器的阻尼分析可知,对 C_{n1} 所在支路上进行无源阻尼会降低开关频率处的“陷波”效果,因此在 C_{n2} 所在支路进行阻尼更为合理。针对不同支路采取 R_d 和 R_d-C_d 阻尼法的拓扑结构见附录 A 中图 A6。

LLCCL 型滤波器无源阻尼分析的 Bode 图见附录 A 中图 A7(a)~(g)。由图可知,LLCCL 型滤波器在谐振支路 1 进行无源阻尼具有与 LLCL 型滤波器无源阻尼相似的幅频特性;在谐振支路 2 进行无源阻尼具有和 LCL 型滤波器无源阻尼相似的幅频特性。谐振无源阻尼在并联支路 1 与支路 2 相比,对于开关频率处的“陷波”效果具有较大的影响。因此,为了保证滤波器谐振抑制尽量不影响滤波效果,应在并联支路 2 进行无源阻尼。

2.5 $L(LCL)_2$ 型滤波器无源阻尼分析

与 LLCCL 型滤波器类似, $L(LCL)_2$ 型滤波器同样具有 2 条并联谐振支路,为了降低对滤波器谐波抑制效果的影响,在 C_{n2} 所在支路进行阻尼更为合理。针对不同支路采取 R_d 和 R_d-C_d 阻尼法的拓扑结构见附录 A 中图 A8。

$L(LCL)_2$ 型滤波器无源阻尼分析的 Bode 图见附录 A 中图 A9(a)~(g)。由图可知, $L(LCL)_2$ 型滤波器在谐振支路 1 与支路 2 进行无源阻尼皆具有和 LLCL 型滤波器无源阻尼相似的幅频特性,但在谐振支路 1 进行无源阻尼对于开关频率处的“陷波”具有较大的影响。因此,在谐振支路 2 进行无源阻尼具有更佳的效果。

综上所述,LCL、LLCL、LCCL 型滤波器都仅具有 1 条并联谐振支路,但 LLCCL、 $L(LCL)_2$ 型滤波器具有 2 条并联谐振支路,在不同谐振支路进行阻尼具有不同的谐振抑制效果,同时会对谐波治理效果产生不同的影响。考虑到开关频率及二倍开关频率处谐波分量占比,LLCCL 型滤波器在并联电容支路进行阻尼的效果更好, $L(LCL)_2$ 型滤波器在二倍开关频率处并联支路进行阻尼的效果更佳,即应尽量选择对谐波抑制影响更小的支路进行谐振阻尼。

3 仿真分析

为了验证理论分析的正确性,依据图 1 搭建仿真模型。模型中采用正弦脉宽调制 (SPWM) 方式、并联 R_d-C_d 阻尼法进行谐振抑制,逆变器采用电容电流反馈法来控制系统稳定。在固定开关频率为 20 kHz (1.26×10^5 rad/s),分别对 LCL、LLCL、LCCL、LLCCL、 $L(LCL)_2$ 5 种不同类型的高阶无源滤波器搭建仿真模型并进行功率谱密度分析。同时,统计不同仿真模型下的总谐波畸变率 (THD)。仿真结果如图 12 所示。

表 4 给出了图 12(a)~(e) 中各滤波器在开关频率 (20 kHz) 及二倍开关频率 (40 kHz) 处的功率谱密度值。从表 4 可以看出,无论在开关频率处还是二倍开关频率处,LLCL 与 LCCL 型滤波器的功率谱密度值近似相等,故 LLCL 与 LCCL 型滤波器的谐波抑制效果相差不大。在开关频率处,功率谱密度值

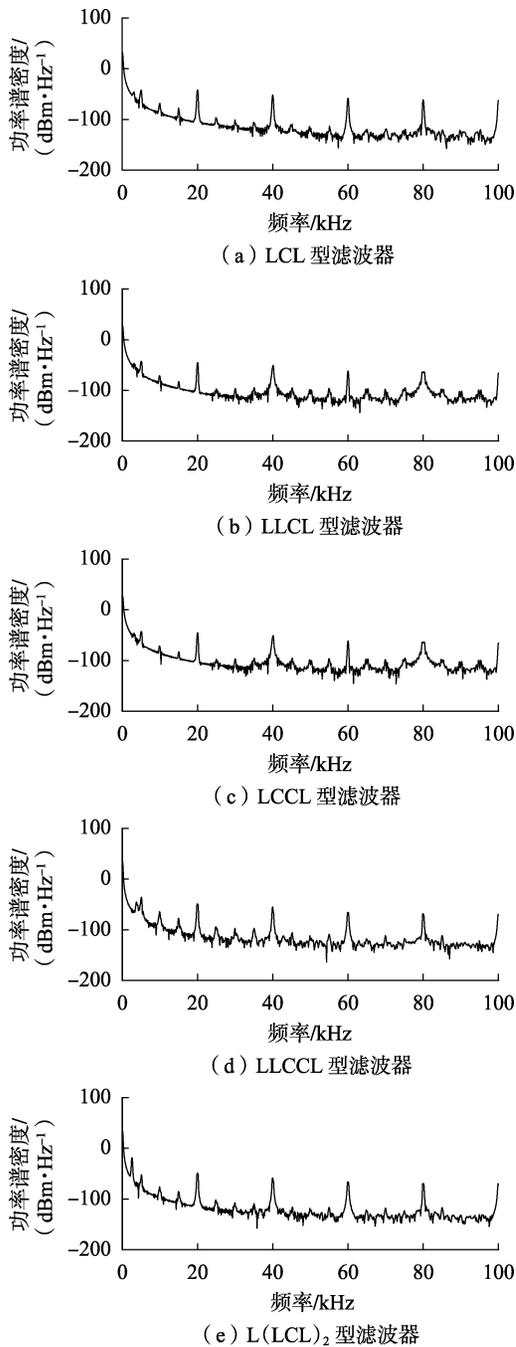


图 12 功率谱密度图

Fig.12 Map of power spectral density

表 4 功率谱密度值

滤波器	功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	
	20 kHz	40 kHz
LCL 型	-41.69	-51.59
LLCL 型	-45.35	-50.61
LCCL 型	-45.36	-50.78
LLCCL 型	-48.84	-55.30
L(LCL) ₂ 型	-49.20	-58.49

按照 LCL、LLCL、LCCL 及 L(LCL)₂ 型滤波器逐渐减小,功率谱密度值越小,则在该频率下滤波器的谐波抑制性能越高;在二倍开关频率处,LLCL 型滤波器的功率谱密度值大于 LCL 型滤波器的功率谱密

度值,这是由于 LLCL 型滤波器的高频谐波衰减率值小于 LCL 型滤波器的高频谐波衰减率值,与前面理论分析完全吻合。

表 5 给出了不同滤波器的 THD,该指标取值的大小代表滤波器谐波抑制性能的优劣。表中所有 THD 均小于 4%,在规定范围内。由表中 THD 值的大小可以知道,LLCL 与 LCCL 型滤波器的滤波效果近乎相同;不同滤波器按照滤波效果优劣的排序依次是 LCL、LLCL、LLCCL、L(LCL)₂ 型滤波器。再次验证了理论分析的正确性。综上所述,L(LCL)₂ 型滤波器具有最佳的滤波性能,同时该滤波器可以缩小滤波器尺寸并降低成本造价。

表 5 不同无源滤波器的 THD

Table 5 THD of different passive filters

滤波器	THD/%	滤波器	THD/%
LCL 型	1.170	LLCCL 型	0.970
LLCL 型	1.042	L(LCL) ₂ 型	0.940
LCCL 型	1.043		

4 结论

本文针对现有的 LCL、LLCL、LCCL、LLCCL、L(LCL)₂ 型高阶无源滤波器的拓扑结构及谐波抑制特性进行对比分析,利用回路电流法重新推导 L(LCL)₂ 型滤波器的传递函数,在幅频域对比分析了不同高阶无源滤波器的谐波抑制特性。针对高阶滤波器的谐振问题进行无源阻尼分析,并确定含有双并联谐振支路的 LLCCL、L(LCL)₂ 型高阶滤波器的最佳阻尼支路。通过仿真结果可知,L(LCL)₂ 型滤波器的谐波抑制性能最佳,且可以缩小滤波器体积并降低成本造价。这对于改善电网电能质量、提高分布式新能源发电并网渗透率、降低配电网改造成本具有重要意义。下一步将在 L(LCL)₂ 型滤波器的参数设计优化方面展开深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] CARRASCO J M,FRANQUELO L G,BIALASIEWICZ J T, et al. Power electronics systems for the grid integration of renewable energy sources;a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2006,53(4):1002-1016.

[2] SHUAI Zhikang, LIU Dingguo, SHEN J, et al. Series and parallel resonance problem of wideband frequency harmonic and its elimination strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(4):1941-1952.

[3] SHEN Guoqiao,XU Dehong,CAO Luping, et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(4):1899-1906.

[4] 魏伟,许胜辉,孙剑波.一种无源滤波器的优化设计方法[J].电力自动化设备,2012,32(1):62-66.

WEI Wei, XU Shenghui, SUN Jianbo. Optimal design of passive

- filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 62-66.
- [5] 王少杰, 罗安. 配电网低压大电流负荷的谐波与无功补偿装备研制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 25-29, 41.
WANG Shaojie, LUO An. Development of harmonics and var compensation equipment for distribution grid with low-voltage high-current load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 25-29, 41.
- [6] 刘宝泉, 郭华, 朱一昕, 等. 三相变流器无源阻尼型 LCL 滤波器的分析与设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 195-205.
LIU Baoquan, GUO Hua, ZHU Yixin, et al. Analysis and design of a passively damping LCL filter in three-phase converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 195-205.
- [7] 张学广, 刘义成, 王瑞, 等. 一种新型的 PWM 变换器 LCL 滤波器有源阻尼控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 188-192.
ZHANG Xueguang, LIU Yicheng, WANG Rui, et al. A novel active damping control strategy for PWM converter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 188-192.
- [8] LIU Z, WU H, LIU Y, et al. Modelling of the modified-LLCL-filter-based single-phase grid-tied Aalborg inverter[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 151-155.
- [9] WU W, SUN Y, LIN Z, et al. A modified LLCL filter with the reduced conducted EMI noise[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3393-3402.
- [10] FANG Jingyang, LI Hongchang, TANG Yi, et al. A magnetic integrated LLCL filter for grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1725-1730.
- [11] 方旌扬, 肖国春, 郑力夫, 等. 一种 LCCL 滤波器及其在半桥电力有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 125-136.
FANG Shengyang, XIAO Guochun, ZHENG Lifu, et al. An LCCL filter for a half-bridge active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(22): 125-136.
- [12] 许德志, 汪飞, 阮毅. LCL、LLCL 和 LLCCL 滤波器无源阻尼分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4725-4735.
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi. Passive damping of LCL, LLCL and LLCCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4725-4735.
- [13] ANZALCHI A, MOGHADDAMI M, MOGHADASI A, et al. A new topology of higher order power filter for single-phase grid-tied voltage-source Inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7511-7522.
- [14] LIU Bangyin, WEI Qikang, ZOU Changyue, et al. Stability analysis of LCL-type grid-connected inverter under single-loop inverter-side current control with capacitor voltage feedforward[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 691-702.
- [15] WU Weimin, HE Yuanbin, BLAABJERG F. An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 782-789.
- [16] ANZALCHI A, MOGHADDAMI M, MOGHADASI A, et al. Design and analysis of a higher order power filter for grid-connected renewable energy systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4149-4161.
- [17] 高键鑫, 吴旭升, 高崑, 等. 一种基波电流补偿高次谐波电流的 LLCCL 谐振结构参数设计方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 201-207.
GAO Jianxin, WU Xusheng, GAO Wei, et al. Design method of fundamental current compensating harmonic current parameters for LLCCL resonant structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 201-207.
- [18] 许德志, 汪飞, 阮毅, 等. 并网接口滤波器拓扑结构推演与分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 15-25.
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi, et al. Topology deduction and analysis of grid-interfacing filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 15-25.
- [19] BERES R N, WANG X, LISERRE M. A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 54-69.

作者简介:



吕志鹏

吕志鹏(1984—),男,山东滨州人,高级工程师,博士,研究方向为配电网电力电子技术(**E-mail**: lvzhipeng@epri.sgcc.com.cn);

吴鸣(1981—),男,江苏扬州人,教授级高级工程师,博士,研究方向为配电网电力电子、微电网(**E-mail**: wuming@epri.sgcc.com.cn);

宋振浩(1989—),男,山东济宁人,工程师,硕士,研究方向为配电网电力电子(**E-mail**: songzhenhao@epri.sgcc.com.cn);

赵婷(1991—),女,山西晋中人,工程师,硕士,研究方向为配电网电力电子(**E-mail**: pds-zhaoting@epri.sgcc.com.cn);

杜刚(1990—),男,吉林白山人,博士研究生,研究方向为电力系统优化调度(**E-mail**: 877454098@qq.com)。

Comparative analysis of high-order passive filters

LÜ Zhipeng¹, WU Ming¹, SONG Zhenhao¹, ZHAO Ting¹, DU Gang²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The inverter side voltage to grid side current transfer functions of the existing LCL, LLCL, LCCL, LLCCL and L(LCL)₂ filters are derived by loop current method. The harmonic suppression effect and resonance characteristics of these five high-order passive filters are deeply studied in amplitude-frequency domain. The possible resonance points of the high-order filter are suppressed by R_d and $R_d - C_d$ damping methods. The different branch damping effects for high-order passive filters with double parallel resonant branches are comparatively analyzed, and the optimal damping branch is determined. The correctness of theoretical analysis is verified by simulation, which shows that the L(LCL)₂ filter has the best harmonic suppression effect while reducing the size and cost of the device.

Key words: passive filters; harmonic suppression; resonance suppression; switching frequency; power quality

附录

$$\left\{ \begin{aligned}
 G_{LLCCL}(s) &= \frac{L_f C_{f1} s^2 + 1}{L_1 L_2 L_f C_{f1} C_{f2} s^5 + L_1 L_2 C_{f2} s^3 + (L_1 L_2 + L_1 L_f + L_2 L_f) C_{f1} s^3 + (L_1 + L_2) s} \\
 f_{s-LLCCL} &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_f C_{f1}}} \\
 f_{r1-LLCCL} &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2L_1 L_2 L_f C_{f1} C_{f2}}} \{L_1 L_2 (C_{f1} + C_{f2}) + L_f C_{f1} (L_1 + L_2) - [(L_1 L_f C_{f1} + L_2 L_f C_{f1} + \\
 &\quad L_1 L_2 C_{f1} + L_1 L_2 C_{f2})^2 - 4L_1 L_2 L_f C_{f1} C_{f2} (L_1 + L_2)]^{1/2}\}^{1/2} \\
 f_{r2-LLCCL} &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2L_1 L_2 L_f C_{f1} C_{f2}}} \{L_1 L_2 (C_{f1} + C_{f2}) + L_f C_{f1} (L_1 + L_2) + [(L_1 L_f C_{f1} + L_2 L_f C_{f1} + \\
 &\quad L_1 L_2 C_{f1} + L_1 L_2 C_{f2})^2 - 4L_1 L_2 L_f C_{f1} C_{f2} (L_1 + L_2)]^{1/2}\}^{1/2}
 \end{aligned} \right. \quad (A1)$$

其中, $G_{LLCCL}(s)$ 为 LLCCL 型滤波器的传递函数; $f_{r1-LLCCL}$ 、 $f_{r2-LLCCL}$ 为 LLCCL 型滤波器的 2 个谐振频率; $f_{s-LLCCL}$ 为 LLCCL 型滤波器的开关频率。

$$\begin{aligned}
 G_{L(LCL)_2}(s) &= [s^4 L_{f1} L_{f2} C_{f1} C_{f2} + S^2 (L_{11} C_{f1} + L_{12} C_{f2}) + 1] / \{s^5 [L_{11} L_{12} L_{13} C_{f1} C_{f2} + \\
 &\quad (L_{11} + L_{12} + L_{13}) L_{f1} L_{f2} C_{f1} C_{f2} + (L_{11} + L_{12}) L_{13} L_{f1} C_{f1} C_{f2} + \\
 &\quad (L_{12} + L_{13}) L_{11} L_{f2} C_{f1} C_{f2}] + s^3 [(L_{11} + L_{12} + L_{13}) (L_{11} C_{f1} + L_{12} C_{f2}) + \\
 &\quad (L_{11} + L_{12}) L_{13} C_{f2} + (L_{12} + L_{13}) L_{11} C_{f1}] + S (L_{11} + L_{12} + L_{13})\}
 \end{aligned} \quad (A2)$$

表 A1 L(LCL)₂ 型滤波器各参数值

Table A1 Parameter values of L(LCL)₂ filter

滤波器	L_{11}/mH	L_{12}/mH	L_{13}/mH	$L_{f1}/\mu\text{H}$	$L_{f2}/\mu\text{H}$	$C_{f1}/\mu\text{F}$	$C_{f2}/\mu\text{F}$
L(LCL) ₂	2.2	1	1	63.34	15.835	1	1

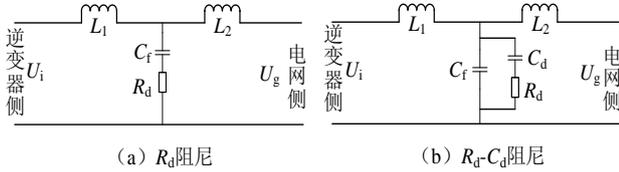
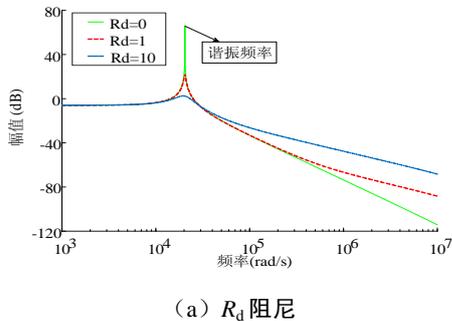
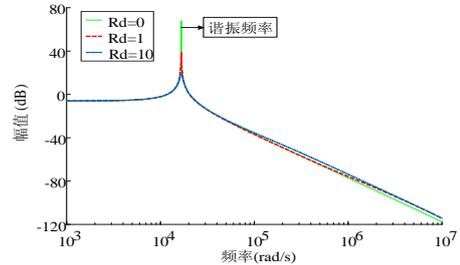


图 A1 LCL 型滤波器无源阻尼方法的拓扑结构

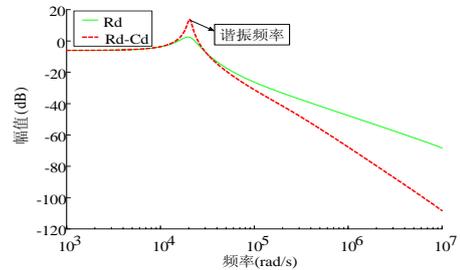
Fig.A1 Topology of LCL filter passive damping



(a) R_d 阻尼



(b) R_d-C_d 阻尼



(c) R_d 阻尼与 R_d-C_d 阻尼对比

图 A2 LCL 型滤波器无源阻尼 Bode 图

Fig.A2 Bode diagram of LCL filter passive damping

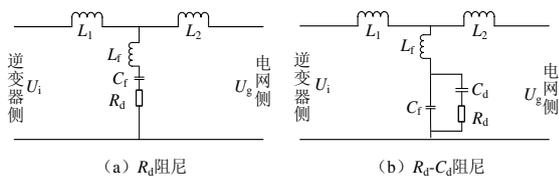
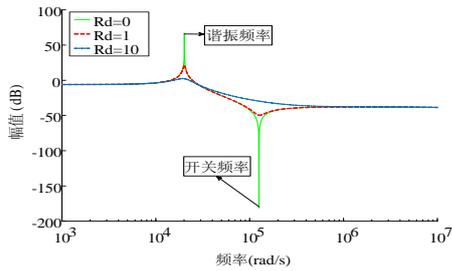
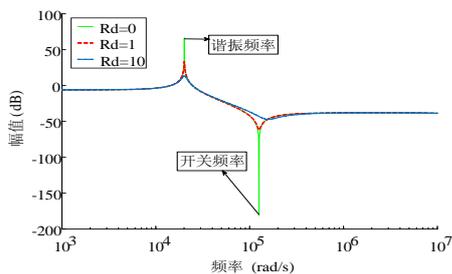


图 A3 LLCL 型滤波器无源阻尼方法的拓扑结构

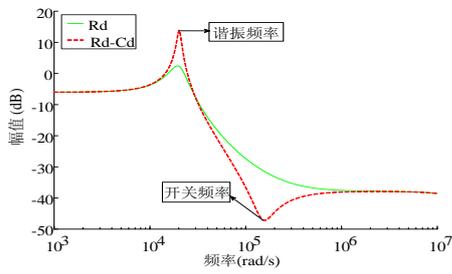
Fig.A3 Topology of LLCL filter passive damping



(a) R_d 阻尼



(b) R_d-C_d 阻尼



(c) R_d 阻尼与 R_d-C_d 阻尼对比

图 A4 LLCL 型滤波器无源阻尼 Bode 图

Fig.A4 Bode diagram of LLCL filter passive damping

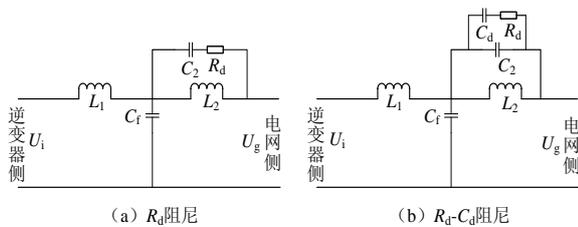


图 A5 LCCL 型滤波器无源阻尼方法的拓扑结构

Fig.A5 Topology of LCCL filter passive damping

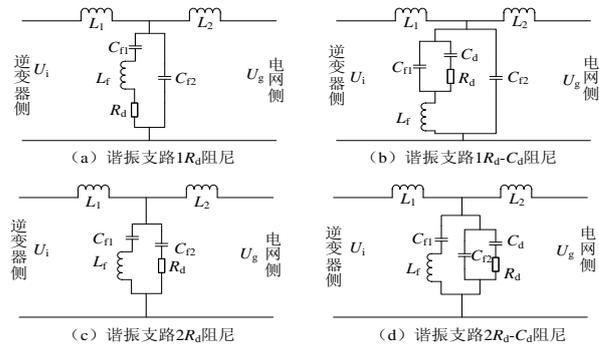
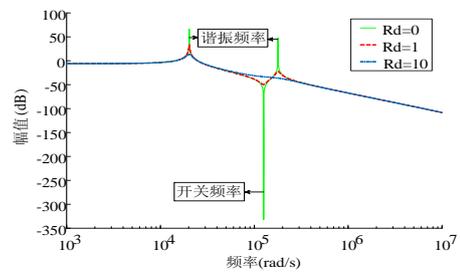
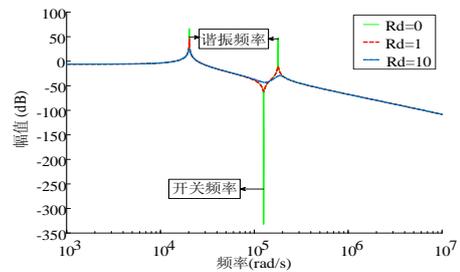


图 A6 LLCCL 型滤波器无源阻尼方法的拓扑结构

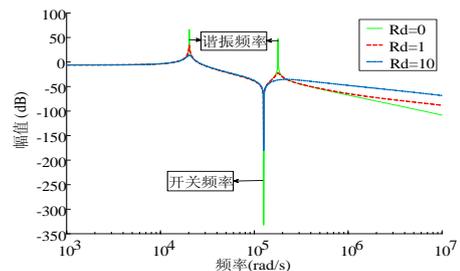
Fig.A6 Topology of LLCCL filter passive damping



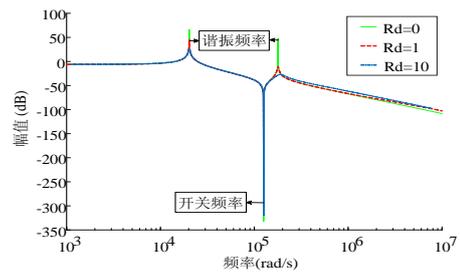
(a) 谐振支路 $1R_d$ 阻尼

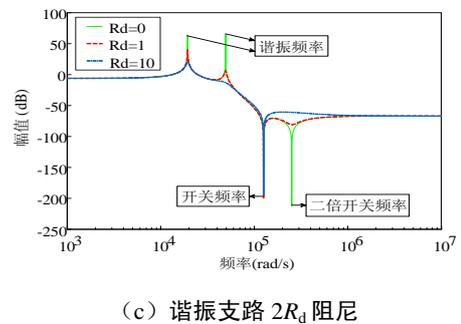
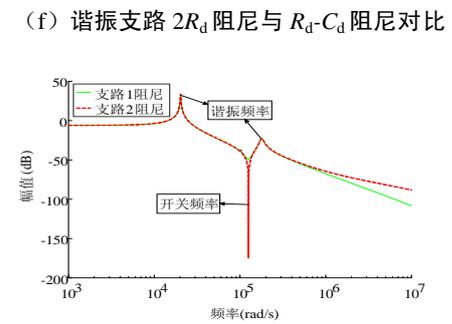
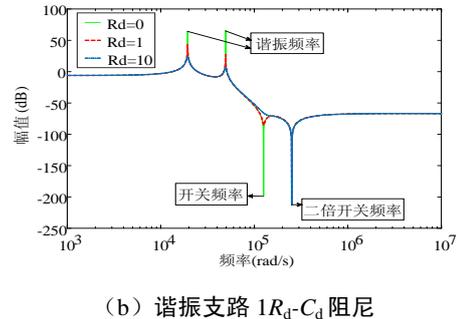
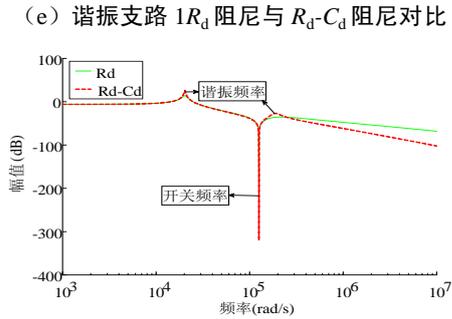
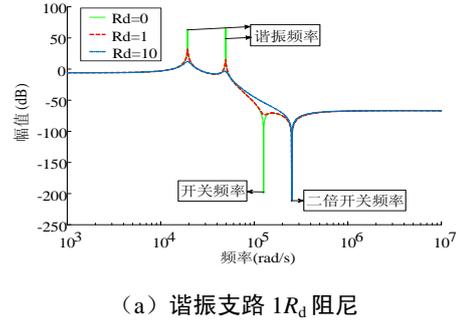
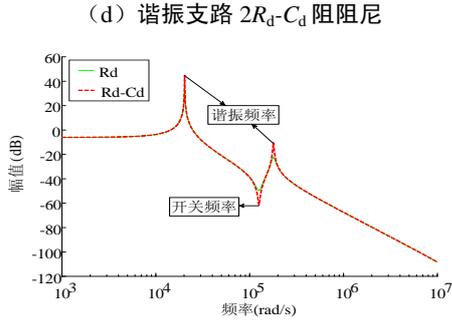


(b) 谐振支路 $1R_d-C_d$ 阻尼



(c) 谐振支路 $2R_d$ 阻尼





(g) 谐振支路 1、2 对比

图 A7 LLCCL 型滤波器无源阻尼 Bode 图

Fig.A7 Bode diagram of LLCCL filter passive damping

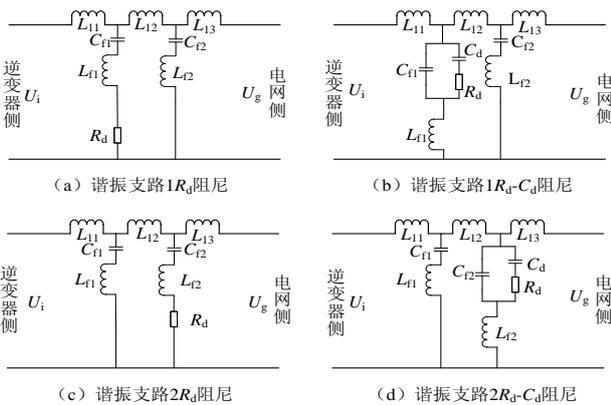
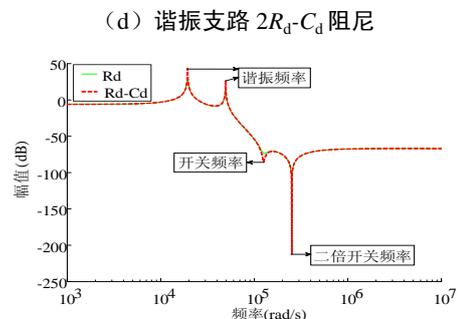
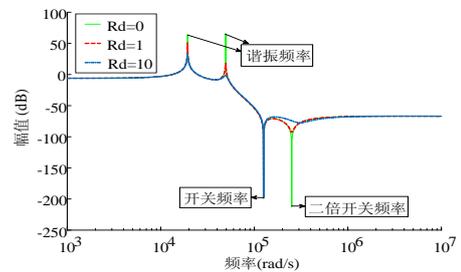
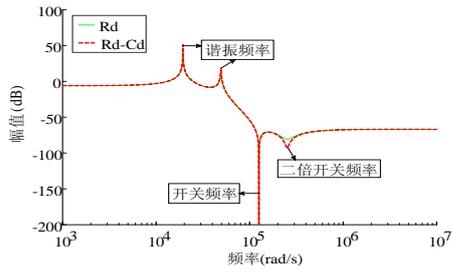


图 A8 $L(LCL)_2$ 型滤波器无源阻尼方法的拓扑结构

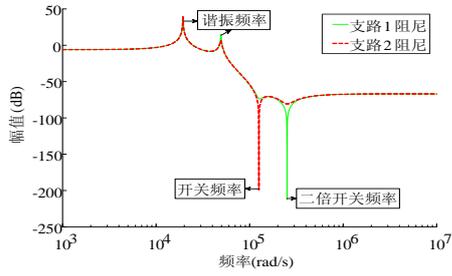
Fig.A8 Topology of $L(LCL)_2$ filter passive damping



(e) 谐振支路 $1R_d$ 阻尼与 R_d-C_d 阻尼对比



(f) 谐振支路 $2R_d$ 阻尼与 R_d-C_d 阻尼对比



(g) 谐振支路 1、2 对比

图 A9 L(LCL)₂ 型滤波器无源阻尼 Bode 图

Fig.A9 Bode diagram of L(LCL)₂ filter passive damping