

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190708

# 基于LLCL滤波器混合阻尼策略设计方法

黄亮<sup>1</sup>, 杨雪梅<sup>1</sup>, 张锐明<sup>2</sup>, 全睿<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 广顺新能源动力科技有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 对基于LLCL滤波器的并网逆变器采用有源阻尼法与无源阻尼法相结合的混合阻尼控制, 能很好地抑制系统谐振峰处和开关频率处谐波。首先, 分析了LLCL滤波器无源阻尼法和有源阻尼法的特性以及两种方法对系统谐振峰处增益与开关频率处增益的影响。其次, 将两种方法进行了对比, 得出了LLCL滤波器混合阻尼参数的设计方法。最后, 通过三相并网逆变器的仿真与实验, 对提出的混合阻尼参数设计方法及控制策略进行验证。

**关键词:** 并网逆变器; LLCL滤波器; 谐振峰; 无源阻尼法; 有源阻尼法; 混合阻尼控制

## Design method of hybrid damping strategy based on an LLCL filter

HUANG Liang<sup>1</sup>, YANG Xuemei<sup>1</sup>, ZHANG Ruiming<sup>2</sup>, QUAN Rui<sup>2</sup>

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Guangshun New Energy Power Technology Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** For a grid-connected inverter based on an LLCL filter, a hybrid damping control method combining active and passive damping methods can well suppress the harmonic at the resonance peak and switching frequency of the system. First, the characteristics of passive and active damping methods of an LLCL filter and the effects of two methods on the gain at resonant peak and switching frequency of the system are analyzed. Secondly, the design method of hybrid damping parameters of LLCL filter is obtained by comparing the two methods. Finally, through simulation and experiment with a three-phase grid-connected inverter, the hybrid damping parameter design method and proposed control strategy are verified.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0105700) and Plan of Applied Basic Research Programs of Wuhan (No. 2017010201010116).

**Key words:** grid-connected inverter; LLCL filter; resonant peak; passive damping method; active damping method; hybrid damping control

## 0 引言

电压源型PWM逆变器具有很多优点, 比如能量可以双向流动、功率因数可调及入网电流谐波畸变率小等<sup>[1-2]</sup>。由于逆变器输出侧会有大量的谐波, 其中开关频率处谐波尤为严重<sup>[3-6]</sup>, 因此在逆变器的输出处需要有滤波器来滤除谐波, 才能进行并网。

目前采用的滤波器主要有L型和LCL型。单电感L型的滤波器结构简单, 但其滤波效果差, 需要较大的滤波电感才能满足入网电流的THD值(总谐波畸变率)<sup>[7]</sup>。但这不利于系统的动态性能, 而且会

增加系统的体积与成本<sup>[8]</sup>。LCL滤波器和单电感相比滤波效果更好, 其高频谐波以-60 dB/dec速率进行衰减。但LCL滤波器在某高次谐波下会发生谐振, 产生一个谐振峰<sup>[9-10]</sup>, 导致逆变器不稳定, 其对开关频率处的谐波抑制效果不明显。为了进一步提高滤波效果, 减小入网电流的THD值, 文献[11-14]提出了LLCL滤波器, 在LCL滤波器的电容支路上串联一个很小的电感, 构成一个开关频率处的谐振电路, 该谐振电路能够很好地抑制开关频率处的谐波。但LLCL滤波器由于本身结构, 同样存在谐振问题。为了抑制谐振峰, 需要采取措施增加LLCL滤波器在谐振频率处的阻尼。目前抑制LCL滤波器谐振的方法主要有无源阻尼法和有源阻尼法<sup>[15-22]</sup>。抑制LCL滤波器谐振的方法同样适用于LLCL滤波器。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0105700); 武汉市应用基础研究计划项目资助(2017010201010116)

采用基于LLCL滤波器的三相并网逆变器,并对其采用无源阻尼法与基于电容电流反馈的有源阻尼法相结合的混合阻尼控制,通过对两种方法进行分析比较得出混合阻尼参数设计原则。采用的控制策略为基于电网电压定向的矢量控制方法,网侧电流作为外环、LC支路电流作为电流内环的双闭环控制,对于网侧电流外环采用PI控制和重复控制相结合的方法。最后通过仿真与实验,证明了所提出的混合阻尼参数设计方法及控制策略的有效性与可行性。

## 1 LLCL滤波器的数学模型

基于LLCL滤波器的三相并网逆变器的电路拓扑如图1所示。 $E$ 为直流输入电压源, $Q_1\sim Q_6$ 为开关管, $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$ 为三相并网逆变器桥臂侧输出电压, $i$ 为逆变器侧输出电流, $i_g$ 为电网侧电流, $i_c$ 为电容支路电流, $L_1$ 为逆变器侧电感, $L_2$ 为电网侧电感, $L_3$ 、 $C$ 分别为滤波支路电感和电容, $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 为三相电网电压,且忽略了 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 串联电阻。

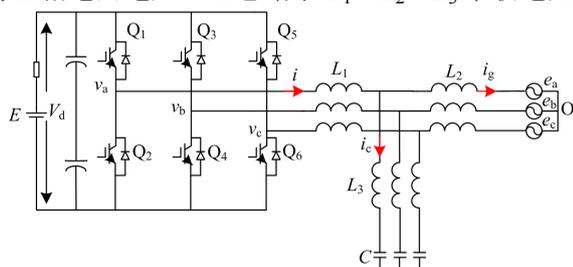


图1 基于LLCL滤波器的三相并网逆变器拓扑图

Fig. 1 Topology of three-phase grid-connected inverter based on LLCL filter

为了便于分析,将对单相LLCL滤波器拓扑进行分析。单相LLCL滤波器拓扑如图2所示。 $u_i$ 为逆变器桥臂侧输出电压, $e_g$ 为电网电压。

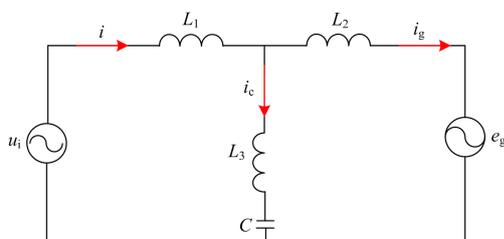


图2 单相LLCL滤波器拓扑图

Fig. 2 Topology of single-phase LLCL filter

根据单相LLCL滤波器拓扑,可以得到LLCL滤波器的结构框图如图3所示。根据图3可以得到LLCL滤波器逆变器侧输出电压 $u_i$ 到入网侧电流 $i_g$ 的传递函数特性,如式(1)所示。

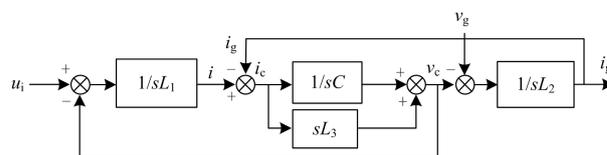


图3 LLCL滤波器结构框图

Fig. 3 Structure diagram of LLCL filter

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{L_3 C s^2 + 1}{C(L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (1)$$

LLCL滤波器的谐振频率 $\omega_{res}$ 为

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_3\right) C}} \quad (2)$$

当式(1)中的 $L_3=0$ 时,即可得到LCL滤波器的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{1}{C L_1 L_2 s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (3)$$

LCL滤波器和LLCL滤波器传递函数 $G(s)$ 和 $G_1(s)$ 的波特图如图4所示。

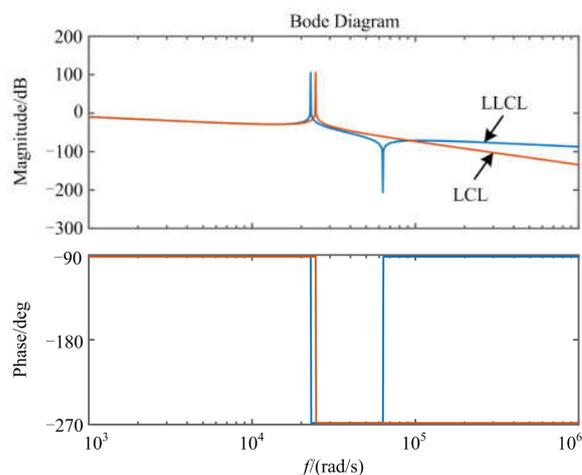


图4 LCL滤波器和LLCL滤波器的波特图

Fig. 4 Bode diagrams of LCL filter and LLCL filter

从图4可以看到,低于谐振频率段,LCL滤波器和LLCL滤波器的幅频特性基本相同,衰减斜率都是 $-20$  dB/dec。在高于谐振频率段过后LCL滤波器的幅频特性以 $-60$  dB/dec的斜率衰减。而LLCL滤波器的幅频特性在某点有一个谐振谷,如果选取合适的 $L_3$ 使得 $L_3$ 、 $C$ 形成串联谐振,谐振频率为开关频率,就可以很好地抑制开关频率带来的谐波,降低入网电流的THD值。

## 2 无源阻尼与有源阻尼的对比分析

无源阻尼是在 LC 支路串联一个电阻  $R$  来抑制系统谐振峰,可以得到逆变器桥臂输出电压  $u_i$  对入网电流  $i_g$  的传递特性函数为

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{L_3Cs^2 + RCs + 1}{C(L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3)s^3 + (L_1 + L_2)RCs^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (4)$$

根据文献[23]可知,阻尼电阻约为电容在谐振频率处容抗的 1/3。逆变器容量为 10 kW 时,电容在谐振频率处的容抗为 21  $\Omega$ ,得到阻尼电阻为 7  $\Omega$ 。

无源阻尼会带来损耗,降低整个系统的效率。因此有大量文献提出有源阻尼法。有源阻尼法分为 3 类:虚拟电阻法、双带通滤波器法、陷波器校正法<sup>[24]</sup>。采用的基于电容电流反馈有源阻尼法实质上是一种陷波器校正法。

基于 LLCL 滤波器的电容电流反馈有源阻尼控制策略结构框图如图 5 所示,其中  $G_i(s)$  为控制器传递函数。

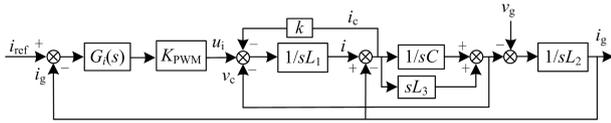


图 5 有源阻尼控制结构框图

Fig. 5 Structure diagram of active damping

逆变器桥臂输出电压  $u_i$  对入网电流  $i_g$  的传递函数为

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{L_3Cs^2 + 1}{C(L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3)s^3 + kL_2Cs^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (5)$$

无源阻尼与有源阻尼波特图如图 6 所示。从图 6 可以看到,基于 LLCL 滤波器的有源阻尼法和无源阻尼法在低频段和高频段的增益都是相同的,谐振峰都被抑制。但是无源阻尼法对 LLCL 滤波器在开关频率处的增益影响很小,同时削弱了 LLCL 滤波器 LC 支路引起的谐振谷,不利于开关频率处谐波的抑制。有源阻尼法有效地抑制了谐振频率处以及开关频率处的谐波。

## 3 混合阻尼参数的设计

电网引入的感性负载增多时,无源阻尼的阻尼效果会降低且会削弱 LLCL 滤波器 LC 支路的谐振

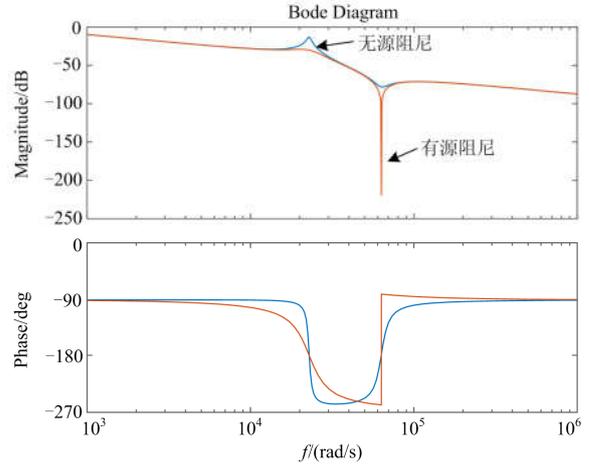


图 6 无源阻尼与有源阻尼波特图

Fig. 6 Bode diagrams of passive damping and active damping

谷,而有源阻尼则不会受到影响;控制延迟对无源阻尼的效果不会产生影响,相对的有源阻尼效果会受到控制延迟的影响而降低。针对两种方法的优缺点,文献[14]提出一种以 LLCL 滤波器为基础的混合阻尼控制策略,通过对 LLCL 滤波器闭环传递函数特征方程的分析,并进行劳斯-赫尔维茨稳定判据,得到  $k$  和  $r$  的关系,最终进行经验取值,得到一组  $k$  和  $r$  的值。该设计混合阻尼反馈参数  $k$  及阻尼电阻  $r$  的方法较为复杂且没有详细地阐明两个参数如何独立设计,最终仿真结果显示,入网电流为 50 A 时的 THD 值为 1.62%。而提出的混合阻尼参数设计方法原理清晰,方法简单,在充分考虑谐振频率、系统稳定性以及损耗等条件下,最终确定合适的混合阻尼反馈参数  $k$  及阻尼电阻  $r$ ,得到入网电流为 50 A 时的 THD 值仅为 0.28%(电流仿真频谱图见第 4 节的图 13),滤波效果远好于文献[14]提出的设计方法。

混合阻尼法控制的结构框图如图 7 所示,其中  $G_i(s)$  为控制器传递函数。

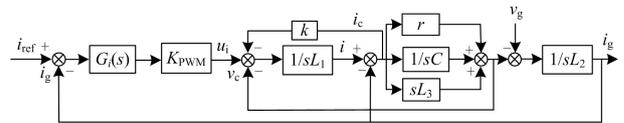


图 7 混合阻尼控制结构框图

Fig. 7 Structure diagram of hybrid damping method

混合阻尼法控制的传递函数如式(6)所示。

$$G_{hh}(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{L_3Cs^2 + rCs + 1}{C(L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3)s^3 + (rL_1 + rL_2 + kL_2)Cs^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (6)$$

参数设计条件如下: 电网电压  $e_g=220\text{ V}$ , 直流母线电压  $U_{dc}=650\text{ V}$ , 开关频率为  $10\text{ kHz}$ , 三相并网逆变器额定容量  $P_n=10\text{ kW}$ 。

### 3.1 混合阻尼反馈参数 $k$ 的设计

有源阻尼实质上是对系统谐振峰附近对应的输出频率成分的反馈控制。当该反馈为负反馈且反馈深度越深对谐振峰抑制效果越好。但如果反馈深度过深, 会影响系统的稳定性, 因此对有源阻尼反馈参数的设计很重要。已有文献提出 LLCL 滤波器的电容电流反馈有源阻尼法, 但都没有提出反馈参数的具体设计, 因此提出了一种反馈参数  $k$  的设计方法。

从图 5 中可以看到, 只要反馈系数  $k$  的取值合适, 就能使式(4)和式(5)的分母相同。  $k$  的取值如式(7)。

$$k = \frac{R(L_1 + L_2)}{L_2} \quad (7)$$

式中,  $R$  为无源阻尼法对应电阻。根据文献[23]可知, 无源阻尼电阻  $R$  约为电容在谐振频率处容抗的  $1/3$ 。根据无源阻尼电阻  $R$  可以得到有源阻尼反馈参数  $k$  的取值。

但式(4)和式(5)的分子不同, 采用无源阻尼法时, 传递函数分子由比例项和微分项组成; 采用有源阻尼法时, 传递函数分子只有比例项。这使得有源阻尼在高频段的增益更低, 抑制谐波能力更好。

根据文献[23]并结合实际电路可得到:  $L_1=2\text{ mH}$ ,  $L_2=1\text{ mH}$ ,  $C=2.5\text{ }\mu\text{F}$ ,  $L_3C$  支路串联谐振频率为开关频率  $10\text{ kHz}$  处时求得  $L_3=0.1\text{ mH}$ , 由章节 2 可知  $R=7\text{ }\Omega$  (为无源阻尼法对应的阻值, 不同于 3.2 节所述的  $r$ ), 根据式(7)可以得到  $k=21$ 。

### 3.2 混合阻尼电阻 $r$ 的设计

3.1 小节根据常规的无源阻尼法电阻得到了有源阻尼系数, 为了进一步提高滤波效果, 同时结合有源阻尼法和无源阻尼法的优势, 在 LC 支路中引入一个阻值较小的电阻  $r$ 。混合阻尼电阻  $r$  会给系统带来额外的损耗, 在设计时不仅需要考虑系统的稳定性和滤波性能, 还需要考虑系统的损耗。  $r$  取值不同时的混合阻尼波特图如图 8 所示。

从图 8 中可以看到,  $r$  不同时, 第一个谐振峰和第二个谐振谷的增益有较大的变化。  $r$  越大第一个谐振峰的衰减程度越大, 但第二个谐振谷的衰减程度却越小, 在选取  $r$  的取值时需要综合考虑。同时考虑到损耗对系统的影响, 最终选取阻尼电阻  $r=1\text{ }\Omega$ 。既满足了滤波性能的要求, 又减小了损耗。

## 4 仿真与实验结果

### 4.1 仿真结果

为进一步验证所提混合阻尼法的正确性, 在

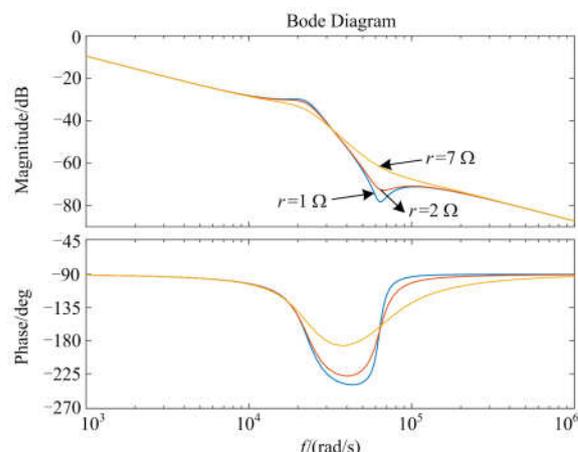


图 8 混合阻尼波特图

Fig. 8 Bode diagram of hybrid damping method

Simulink 中进行了基于  $10\text{ kW}$  三相并网逆变器的仿真。图 9 为三相电流、电压波形图, 图 10—图 13 为电流频谱图, 基波频率为  $50\text{ Hz}$ , 开关频率为  $10\text{ kHz}$ , 电流基波峰值为  $20\text{ A}$ , 图 13 电流基波峰值为  $50\text{ A}$ 。

本文对网侧电流采用 PI 控制和重复控制相结合的方法, 使得逆变器的功率因数较高。图 9 中三相并网电流能够很好地跟踪电网电压, 两者之间的相角差为零, 输出并网电流的 THD 值较小, 且逆变器有很好的动态性能, 说明了控制策略的可行性。

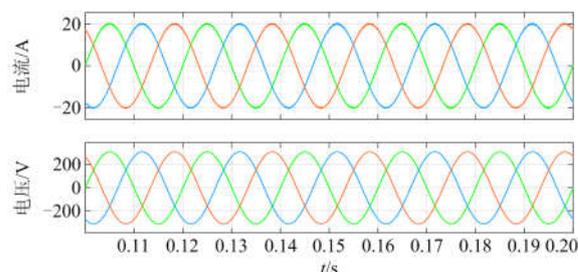


图 9 LLCL 滤波器无源阻尼法电流、电压仿真波形

Fig. 9 Current and voltage simulation waveforms of LLCL filter with passive damping method

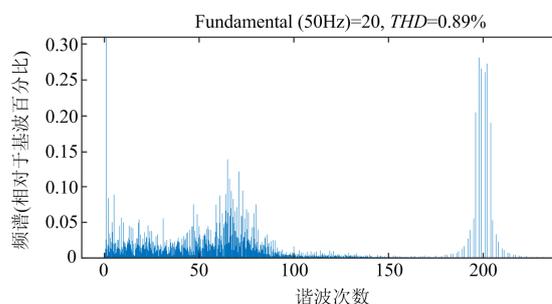


图 10 LLCL 滤波器无源阻尼法电流仿真频谱

Fig. 10 Current simulation spectrum of LLCL filter with passive damping method

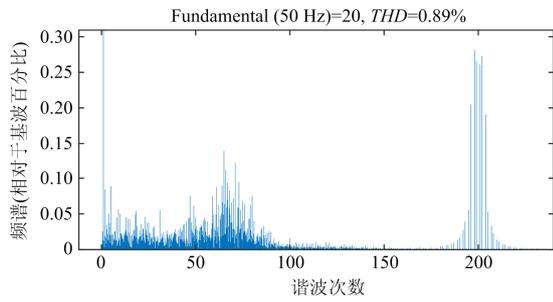


图 11 LLCL 滤波器有源阻尼法电流仿真频谱  
Fig. 11 Current simulation spectrum of LLCL filter with active damping method

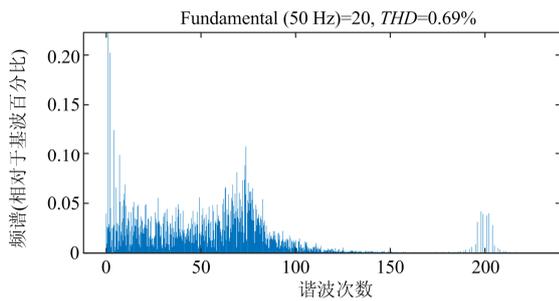


图 12 LLCL 滤波器混合阻尼法电流仿真频谱  
Fig. 12 Current simulation spectrum of LLCL filter with hybrid damping method

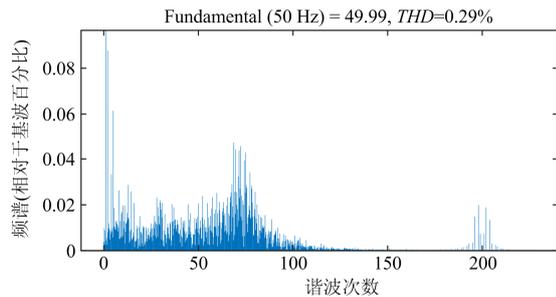


图 13 LLCL 滤波器混合阻尼法电流仿真频谱  
Fig. 13 Current and voltage simulation waveforms of LLCL filter with hybrid damping method

比较图 10、图 11 和图 12 可知，LLCL 滤波器混合阻尼控制在开关频率处的幅值衰减能力要比有源阻尼和无源阻尼控制大很多，在混合阻尼控制下的总谐波含量要小于单独控制下有源阻尼法和无源阻尼法的 LLCL 滤波器，混合阻尼控制下的 THD 值为 0.69%。综上所述，混合阻尼控制下的 LLCL 型滤波器具有更好的滤波能力，与前文的理论分析一致。

#### 4.2 实验结果

三相并网逆变器的实验测试样机如图 14 所示，不同功率下三相并网逆变器并网电流波形如图 15—图 17 所示。从图 15—图 17 中看到，采用 LLCL

滤波器混合阻尼控制，可以很好地抑制谐波，三相电流周期为 20 ms，频率  $f=50$  Hz，A、B、C 三相电流信号各相差  $120^\circ$ ，随着功率的增加，电流波形的正弦度变得更好。



图 14 实验样机图  
Fig. 14 Experimental prototype

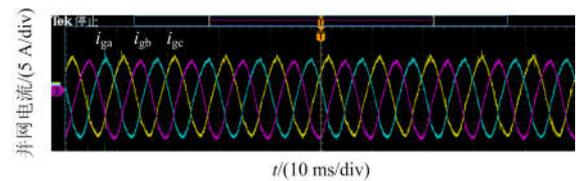


图 15 功率为 2.6 kW 时三相并网电流波形  
Fig. 15 Three-phase grid-connected current waveform with power of 2.6 kW

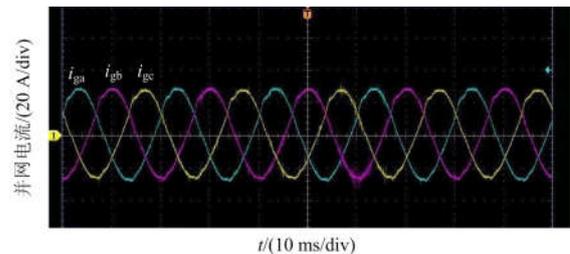


图 16 功率为 10 kW 时三相并网电流波形  
Fig. 16 Three-phase grid-connected current waveform with power of 10 kW

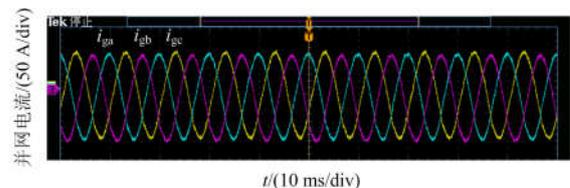


图 17 功率为 25 kW 时三相并网电流波形  
Fig. 17 Three-phase grid-connected current waveform with power of 25 kW

并网时功率与 THD 值变化曲线图如图 18 所示。从图 18 中可以看出, 随着功率的增加, 并网模式下的电流 THD 值是在不断减小的。功率在 25 kW 时, THD 值只有 0.8%, 远低于要求的 5%, 在小功率时, 由于采样精度会稍差一点, 但是功率为 3 kW 和 5 kW 时 THD 值也没有超过 5%。表明采用的 LLCL 滤波器混合阻尼控制方法能够很好地抑制谐波, 降低入网电流的 THD 值。

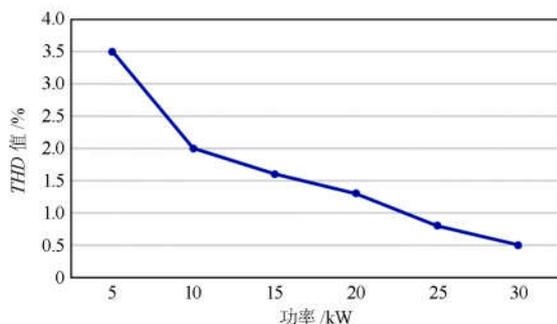


图 18 并网时功率与 THD 值变化曲线图

Fig. 18 Power and THD curve in grid-connected mode

## 5 结论

旨在分析混合阻尼控制策略并将其与无源阻尼和有源阻尼策略进行对比研究。分析了 LLCL 滤波器的数学模型和电网电压到入网电流的传递函数特性, 对比 LCL 滤波器和 LLCL 滤波器的波特图, LLCL 滤波器产生的谐振谷能很好地抑制开关频率处的谐波。分析了 LLCL 滤波器无源阻尼法和有源阻尼法的特性, 在 LLCL 滤波器的 LC 支路添加一个阻尼电阻会改善谐振峰, LLCL 滤波器在谐振频率处的谐振峰被抑制的同时, 其高频段的抑制能力变弱。有源阻尼法能很好地抑制开关频率处的谐波, 但受控制延迟的影响, 进一步提出混合阻尼控制法。首先, 通过选择合适的混合阻尼反馈系数能够使有源阻尼取得较好的滤波性能, 与无源阻尼法对比分析得出, 混合阻尼反馈系数与期望的无源阻尼电阻、网侧电感和逆变器侧电感有关。其次, 在满足系统稳定性、滤波效果和尽量减小损耗的要求下, 设计了混合阻尼电阻。仿真结果表明, 混合阻尼控制下的 LLCL 滤波器能够很好地抑制系统谐振频率处和开关频率处的谐波, 降低入网电流的 THD 值。最后实验结果也表明提出的混合阻尼参数设计方法及控制策略的实用性和可行性。

## 参考文献

[1] 胡金高, 郑大星. 有源电力滤波器的 LCL 滤波器分析与设计[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 349-351.

- HU Jingao, ZHENG Daxing. Analysis and design of LCL filter in active power filter[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 349-351.
- [2] 金亮亮, 周荔丹, 姚钢, 等. 适用于并网逆变器的新型 LCL 滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 1-8.
- JIN Liangliang, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. A novel LCL filter adopted in grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.
- [3] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [4] CHANNEGOWDA P, JOHN V. Filter optimization for grid interactive voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4106-4114.
- [5] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
- XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [6] WANG J, YAN J D, JIANG L, et al. Delay-dependent stability of single-loop controlled grid-connected inverters with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 743-757.
- [7] 刘计龙, 马伟明, 肖飞, 等. 一种 LCL 滤波器有源阻尼策略与设计方法[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5): 22-27.
- LIU Jilong, MA Weiming, XIAO Fei, et al. An active damping control strategy and design method for LCL filter[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(5): 22-27.
- [8] 王要强, 吴凤江, 孙力, 等. 阻尼损耗最小化的 LCL 滤波器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 90-95.
- WANG Yaoqiang, WU Fengjiang, SUN Li, et al. Optimized design of LCL filter for minimal damping power loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 90-95.
- [9] 辛征, 孙树敏, 何晋伟, 等. 基于复合电流调节的单相 LCL 并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 123-129.
- XIN Zheng, SUN Shumin, HE Jinwei, et al. A composite current regulation based single-phase LCL grid-connected inverter control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 123-129.
- [10] 高锋阳, 杜强, 乔焱, 等. 逆变器侧电流反馈的 LCL 型三相光伏并网逆变器解耦控制[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2018, 46(9): 122-128.
- GAO Fengyang, DU Qiang, QIAO Yao, et al. Decoupling control strategy with inverter-side current feedback for LCL-type three-phase PV grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 122-128.
- [11] 刘海涛, 唐龙. 基于 LLCL 型滤波器的三相并网逆变器控制策略仿真分析[J]. 大功率变流技术, 2015(3): 15-18.
- LIU Haitao, TANG Long. Simulation analysis of control strategy for three-phase grid-connected inverter based on LLCL filter[J]. High Power Converter Technology, 2015(3): 15-18.
- [12] 王玉柱. 单相 LLCL 型并网逆变器的控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- WANG Yuzhu. Control strategy research of single-phase LLCL grid-connected inverter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [13] 彭崇文, 曹太强, 郭筱璞, 等. 单相 LLCL 并网逆变器的研究[J]. 电气传动, 2018(12): 35-38.
- PENG Chongwen, CAO Taiqiang, GUO Xiaoying, et al. Research on single-phase LLCL grid-connected inverter[J]. Electrical Drive, 2018(12): 35-38.
- [14] 李嘉俊, 张建成, 李倩, 等. 用于光伏发电系统的 LLCL 型滤波器混合阻尼控制策略[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 30-34.
- LI Jiajun, ZHANG Jiancheng, LI Qian, et al. Hybrid damping control strategy for LLCL filters of PV systems[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 30-34.
- [15] 王海松, 王晗, 张建文, 等. LCL 型并网逆变器的分裂电容无源阻尼控制[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 895-902.
- WANG Haisong, WANG Hao, ZHANG Jianwen, et al. Split-Capacitor passive damping control for LCL grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 895-902.
- [16] 张宁云. LCL 型单相光伏并网逆变器电流控制与有源阻尼控制技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- ZHANG Ningyun. Study on the injected current control and active damping control of grid-connected single photovoltaic inverter with LCL filter[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [17] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. 单相 LCL 型并网逆变器功率控制及有源阻尼优化方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 144-154.
- ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A single-phase grid-connected power control and active damping optimization strategy with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 144-154.
- [18] 许津铭, 谢少军, 黄如海. LCL 滤波并网逆变器的鲁棒电流控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 99-104.
- XU Jinming, XIE Shaojun, HUANG Ruhai. A robust current control strategy for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 99-104.
- [19] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
- XU Zhiying, XU Aiguo, XIE Shaojun. Dual-loop grid current technique for grid-connected inverter using an LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41.
- [20] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. LCL 滤波电压源并网逆变器多环控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 66-70.
- YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Strategy design of multiple feedback loop control for grid-connected voltage source inverter with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 66-70.
- [21] 阚加荣, 谢少军, 姚志垒, 等. LCL 滤波并网逆变器的进网电流相位校正技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 166-171.
- KAN Jiarong, XIE Shaojun, YAO Zhili, et al. A phase correction technique for grid side current of grid-connected inverter with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 166-171.
- [22] 杨峰峰, 杨旭红. 基于 LCL 滤波有源阻尼控制的 Z 源逆变器并网研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 38-45.
- YANG Fengfeng, YANG Xuhong. Research on Z-source inverter grid-connected system based on LCL filter of active damping control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 38-45.
- [23] 魏星. 基于 LCL 滤波器的三相并网逆变器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- WEI Xing. Research on three-phase grid-connected inverters with LCL filter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [24] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-08-09

作者简介:

黄亮(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子, 物联网; E-mail: jat\_abc@163.com

杨雪梅(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子; E-mail: 1115076597@qq.com

张锐明(1959—), 男, 博士, 主要研究方向为燃料电池汽车, 物联网. E-mail: 871365165@qq.com

(编辑 魏小丽)