

# 弱电网下 LCL 逆变器的有源阻尼控制策略研究

王翰文, 曾成碧, 苗 虹  
(四川大学电气工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 在弱电网中, 由于电网阻抗的存在, 会导致新能源并网 LCL 滤波器固有谐振频率发生偏移, 传统有源阻尼控制策略则无法保证系统的稳定性。而且随着新能源发电在电力系统中的占比不断提高, 如何降低运营成本成为了研究热点。因此本文提出一种基于并网电流和公共耦合电压反馈的新型控制策略, 该控制策略不仅提供了有源阻尼以抑制 LCL 谐振, 而且减少了传感器的使用, 还能对大范围变化的电网阻抗有较强的适应能力。通过仿真和实验表明, 与传统的控制策略相比, 在改进的策略下弱电网的实用范围增加, 系统的稳定性得到提高, 对谐波的抑制能力提升, 并网电流质量有了良好的改善。

**关键词:** 弱电网; LCL 滤波器; 并网逆变器; 有源阻尼

## Research on Active Damping Control Strategy for LCL Inverter in Weak Grid

WANG Hanwen, ZENG Chengbi, MIAO Hong  
(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In a weak grid, due to the existence of grid impedance, the natural resonant frequency of a new energy grid-connected LCL filter will shift, and the traditional active damping control strategy cannot guarantee the system stability. Moreover, as the proportion of new energy power generation in the power system continues to grow, how to reduce the operating costs is a hot topic for research. Therefore, a novel control strategy based on grid-connected current and common coupling voltage feedback is proposed in this paper, which not only provides active damping to suppress LCL resonance, but also reduces the use of sensors. In addition, it has a strong adaptability under wide-ranging changes in grid impedance. Simulation and experimental results show that, compared with that under the traditional control strategy, the practical range of weak grid under the improved strategy increases, the system stability is enhanced, and the capability to suppress harmonics is raised, indicating that the quality of grid-connected current is well improved.

**Keywords:** Weak grid; LCL filter; grid-connected inverter; active damping

随着国家对碳排放要求的提高, 导致石化能源的占比逐步降低。如何开发可再生清洁能源已成为当前能源发展的重点<sup>[1-3]</sup>。并网逆变器作为清洁能源

发电系统与电网之间的连接枢纽, 发挥着关键作用。由于 LCL 滤波器具有体积小, 抗高次谐波干扰能力强的优点, 广泛应用于并网逆变器中。然而, LCL 滤波器是一个三阶系统, 如果没有适当的阻尼, 会引起系统的谐振, 导致系统不稳定<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-07-08, 2021-07-29, 2021-08-13; 录用日期: 2021-08-27; 网络首发日期: 2022-02-17  
基金项目: 国家重点研发资助项目(2018YFC1505502-03); 成都市科技局资助项目(2019-YF05-02107-SN); 四川省重点研发资助项目(21ZDYF3753)

This work is supported by National Science and Technology Program under the grant 2018YFC1505502-03; Chengdu Science and Technology Program under the grant 2019-YF05-02107-SN; Sichuan Science and Technology Program under the grant 21ZDYF3753

LCL 滤波器的阻尼方法可分为有源阻尼和无源阻尼<sup>[6]</sup>。无源阻尼虽阻尼效果好, 但造成较大的损耗。有源阻尼中, 通常采用电流反馈来提供系统阻尼, 例如电容电流反馈<sup>[7]</sup>, 逆变器侧电流反馈<sup>[8]</sup>。但是这需要较多的传感器来采集对相应变量的数据, 增加了成本和带来误差问题。

为了减少传感器的使用,文献[9-11]提出了具有单个电网电流反馈回路的高通滤波器 HPF(high-pass filter)有源阻尼技术,但是没考虑弱电网中阻抗变化带来的影响。文献[12]则提出了一种电流预测控制,这种方法需要对控制系统进行精确的建模,实现难度大。文献[13]采用基于公共耦合点电压  $v_{pcc}$  的 HPF 前馈有源阻尼方法,有较好的谐振抑制效果,但是该方法只能在一定的电网阻抗范围内才能保持系统稳定,因此存在局限性。

为了提高与弱电网连接的 LCL 逆变器的稳定性,并且减少传感器的使用,本文提出了一种基于并网电流和公共耦合电压  $v_{pcc}$  的新型的有源阻尼策略。建立相应的 LCL 逆变器的数学模型,对传统的控制策略和提出的改进控制策略进行比较分析,同时考虑控制时延的情况下分析所提出方法的稳定性。最后通过仿真和实验验证该方法的有效性。

### 1 系统数学模型与分析

#### 1.1 LCL 逆变器数学模型

新能源典型的 LCL 型三电平并网逆变器的配置如图 1 所示,其中:  $U_{dc}$  是直流母线电压;  $L_1$  是逆变器侧的电感;  $C$  是滤波电容器;  $L_2$  是并网侧电感。电网阻抗通常由电网电阻  $R_g$  和电网电感  $L_g$  组成,但是电阻分量的存在有利于并网系统的稳定性,因此在分析最恶劣的工作条件时,仅考虑存在电网电感  $L_g$ 。  $i_{li}$  为逆变器输出电流,  $i=i_a, b, c$ (下同);  $i_{2i}$  是并网电流;  $i_C$  是电容电流;  $u_i$  是逆变器的输出电压;  $u_{Ci}$  是电容电压;  $u_{gi}$  是并网电压。

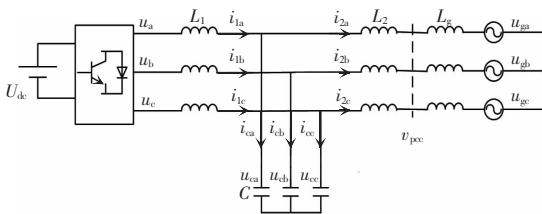


图 1 三相 LCL 并网逆变器拓扑结构  
Fig. 1 Topology of three-phase LCL grid-connected inverter

将基尔霍夫定律和拉普拉斯变换应用于图 1, 系统的数学模型为

$$\begin{cases} sL_1 I_1(s) = U(s) - U_C(s) \\ s(L_2 + L_g) I_1(s) = U_C(s) - U_g(s) \\ sC_i U_C(s) = I_1(s) - I_2(s) \end{cases} \quad (1)$$

为了简便控制,将式(1)进行  $\alpha\beta$  变换<sup>[14]</sup>,以  $\alpha$  轴为例,则式(1)可变换成

$$\begin{cases} sL_1 I_{1,\alpha}(s) = U(s) - U_{C,\alpha}(s) \\ s(L_2 + L_g) I_{1,\alpha}(s) = U_C(s) - U_{g,\alpha}(s) \\ sC_i U_{C,\alpha}(s) = I_{1,\alpha}(s) - I_{2,\alpha}(s) \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.2 控制策略分析

在  $\alpha\beta$  坐标系中使用 Quasi-PR 控制可实现给定电流的静态无差错跟踪,并且为了有效地抑制电网中存在的高次谐波对电网侧电流的影响,通常将 QPR 控制器与多谐振补偿控制器<sup>[15]</sup>并联使用。用于控制电网侧电流的组合控制器为

$$G_R(s) = K_p + \frac{2K_{r1}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} + \sum_{m=1}^4 \frac{\omega_{fm} s}{s^2 + 2\omega_f s + [(2m+1)\omega_0]^2} \quad (3)$$

式中:  $K_p$  为  $G_R(s)$  的比例系数;  $K_{r1}$  为  $G_R(s)$  的基本频率谐振系数;  $\omega_c$  为 QPR 控制器的截止带宽;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  为控制器的基本角频率,  $f_0$  为基波频率;  $2m+1$  为谐波频率阶数,  $m=1, 2, 3, 4$ ;  $\omega_f$  为谐振深度;  $\omega_{fm}$  为多谐振控制器的谐振系数。

依据式(2)与式(3),系统的控制框图如图 2 所示。

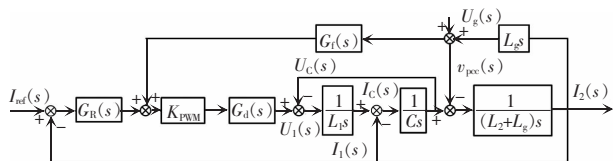


图 2 并网逆变器的反馈控制框图  
Fig. 2 Block diagram of feedback control of grid-connected inverter

在图 2 中,  $I_{ref}(s)$  为给定电流的参考值;  $U_1$  和  $I_1$  为电感器  $L_1$  上的电压以及流过电感器  $L_1$  的电流;  $U_C$  和  $I_C$  为电容器  $C$  上的电压以及流经电容器  $C$  的电流;  $I_2$  为流经电感器  $L_2$  的电流;  $K_{PWM}$  为 PWM 逆变器的传递函数,表示为  $U_{di}/U_{tri}$ ,  $U_{tri}$  是三角载波幅

度。 $G_d(s)$ 为系统延迟,通常由采样延时、离散化计算延迟和 PWM 调制延时组成,表示为  $e^{-sT_s}$ 。调制方式采用非对称正采样正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation), 采样频率  $f_s$  是开关频率  $f_{sw}$  的两倍。 $G_f(s)$ 为电压前馈环节,增益为  $1/K_{PWM}$ 。另外,如果直流母线电压比较低,PWM 出现饱和和情况时,可以采用 SVPWM 调制,以保证控制策略的有效性。

为了抑制 LCL 逆变器的固有谐振,文献[11]中采用了基于并网电流的一阶 HPF 反馈有源阻尼法。相应的传递函数框图如图 3 所示,并且依据该方法计算出  $\omega_h=13\ 000$  和  $k_h=3$ 。对应的开和闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{G_R(s)K_{PWM}}{AL_1(L_2+L_g)C+B_1(L_1+L_2)-B_2L_g} \quad (4)$$

$$G_{\text{class}}(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (5)$$

式中:  $A=(s^4+\omega_1s^3)$ ;  $B_1=(s^2+\omega_1s)$ ;  $B_2=k_cK_{PWM}s$ 。

依据式(5)画出对应的闭环极点分布图,如图 4 所示。

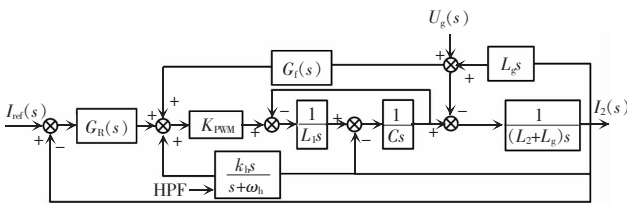


图 3 加入 HPF 后系统的控制框图

Fig. 3 Block diagram of control of system with HPF

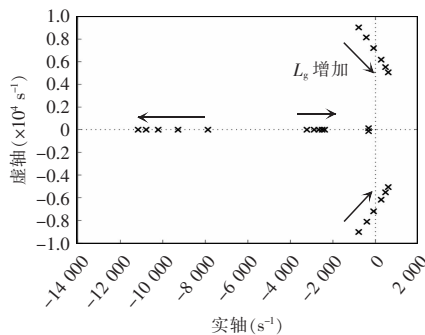


图 4 不同阻抗下并网电流 HPF 策略闭环极点分布

Fig. 4 Pole distribution under HPF strategy for grid-connected current with different grid impedances

可以发现,随着电网阻抗的增加,并网电流的主导极点逐渐向复平面的右半部分移动,最终并网导致系统失稳,这说明并网电流 HPF 有源阻尼反馈方法的弱电网范围较小。

同样的,文献[13]采用并网点电压  $v_{pcc}$  作为有源阻尼反馈量,并且采用 HPF 作为反馈函数。由于存在锁相环,必须在  $v_{pcc}$  处收集电压信号,无需添加额外的电压传感器。因此,在电网较弱的情况下,合理地设计  $v_{pcc}$  处的反馈回路,可以获得较好的阻尼效果,实现系统稳定性。但是该方法使用的必要条件是,在一定电网阻抗之上,因此实用范围有局限。

## 2 改进控制策略的提出

为了减少传感器的使用,并扩大并网弱电网的范围,及并网逆变器的稳定性,本文把并网电流  $I_2$  和公共耦合点电压  $v_{pcc}$  作为反馈变量,提出一种改进的有源阻尼法,相应的控制结构图如图 5 所示。

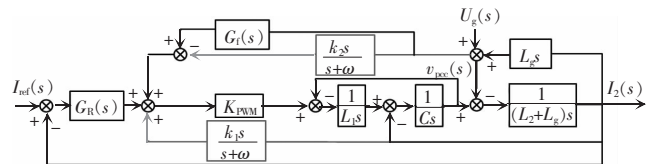


图 5 加入改进的控制策略后系统的控制框图

Fig. 5 Control block diagram of system after adding the improved control strategy

结合图 5 和式(4),得出在添加有源阻尼反馈环节后系统的开环传递函数的公式为

$$G^3(s) = \frac{G_R(s)K_{PWM}}{AL_1(L_2+L_g)C+B_1(L_1+L_2)+k_2K_{PWM}L_g s^2-B_2} \quad (6)$$

式中:  $A=(s^4+\omega s^3)$ ;  $B_1=(s^2+\omega s)$ ;  $B_2=k_1K_{PWM}s$ 。

首先需要保证系统在具有较小电网阻抗的情况下能够保持稳定,则保持前文的  $\omega=13\ 000$  和  $k_1=3$ 。通常来说,系统短路比(SCR)小于 10 的情况被称为弱电网(本文对应的  $L_g=1\ \text{mH}$ ),因此在  $L_g=1\ \text{mH}$  的弱电网背景下讨论  $k_2$  的取值。由式(10)则可画出  $k_2$  变化时对应的系统开环伯德图,如图 6 所示。

从图 6 可知,随着  $k_2$  的增大,系统的开环截止

频率 $f_c$ 降低,但是系统的开环相位裕度 PM(phase margin)由负变正,系统由不稳定变为稳定,说明了在弱电网下,采用所提出的改进有源阻尼控制法具有更好的稳定性。为了获得较好的 PM 以及较大的带宽,本文选择 $k_2=1$ 。同时为了进一步验证改进的控制策略在不同弱电网背景下的优越性和稳定性,电网阻抗 $L_g$ 从 0-3 mH 变化时系统的开环伯德图与对应的闭环极点分布图,分别如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可看出,改进的控制策略能够有效的抑制谐振峰,并且具有较好的稳定性与鲁棒性。由图 8 与图 4 相比可以看出,在不同的弱电网下,不同电网阻抗值,并网电流的闭环主导极点均处于复平面的左半部分,并网电流 $I_2$ 具备良好的稳定性。

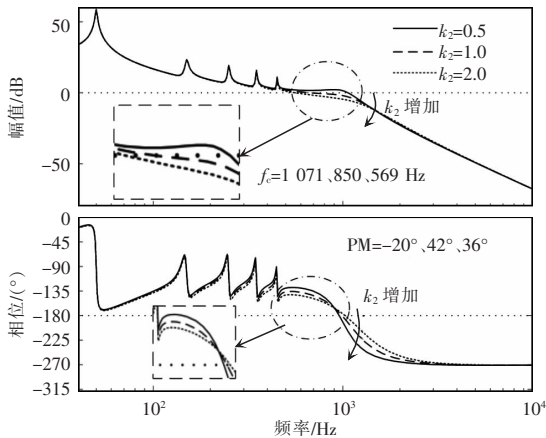


图 6  $k_2$  变化时系统开环伯德图

Fig. 6 Bode diagram of system open-loop when  $k_2$  changes

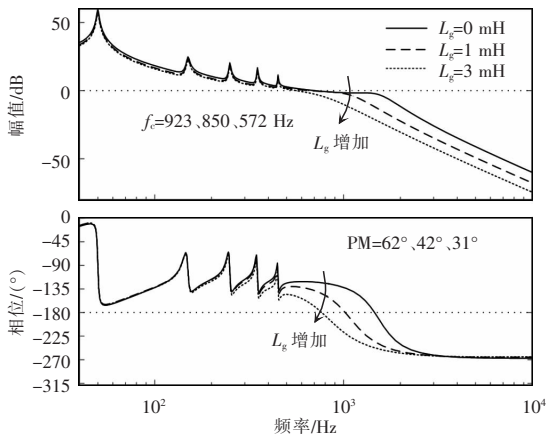


图 7 改进控制策略的系统开环伯德图

Fig. 7 Bode diagram of system open-loop under improved control strategy

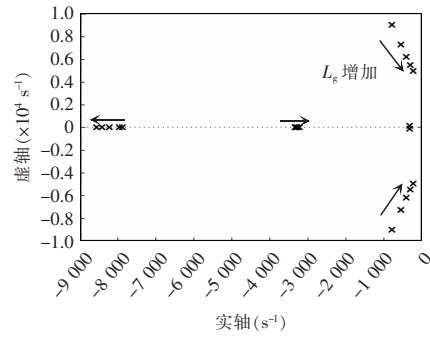


图 8 不同阻抗下改进策略闭环极点分布

Fig. 8 Closed-loop pole distribution under improved strategy with different electrical impedances

因此采用本文所提的改进的控制策略,不仅节约了传感器,解决了文献[11]与文献[13]中所存在的问题,并有效改善并网电流在弱电网下的稳定性。

### 3 考虑控制延时的改进方法稳定性分析

#### 3.1 稳定性分析

研究的 LCL 逆变器系统的传递函数图如图 9 所示,其中 $G_d(s)$ 是系统时间延迟,其 Pade 表示为

$$G_d(s) \approx \frac{1 - \frac{T_d s}{2} + \frac{(T_d s)^2}{12}}{1 + \frac{T_d s}{2} + \frac{(T_d s)^2}{12}} \quad (7)$$

那么本文所提出的改进的控制策略的系统开环和闭环传递函数为

$$G^4(s) = G_R(s)K_{PWM}(s+\omega_h)G_d(s) / [(s^4+\omega_h s^3)L_1(L_2+L_g)C + (s^2+\omega_h s)(L_1+L_2+L_g-G_d(s)L_g) + k_1 s^2 K_{PWM}G_d(s)L_g - k^2 K_{PWM}G_d(s)s] \quad (8)$$

$$G_{\text{close}}(s) = \frac{G^4(s)}{1+G^4(s)} \quad (9)$$

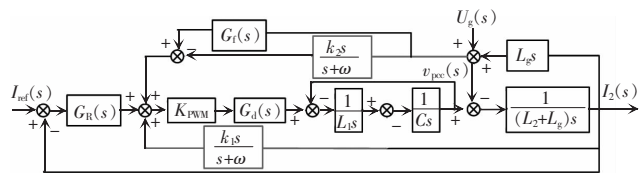


图 9 系统传递函数

Fig. 9 Transfer function of system

当电网阻抗  $L_g$  在 (0~3 mH) 范围内变化时,式(9)中的  $k_2$  为 0 即可得传统并网电流 HPF 反馈策略的闭环主导极点分布图,如图 10 所示。而改进的控制策略的系统闭环主导极点分布图则如图 11 所示。

由图 10 和图 11 对比可知,考虑控制延时后,采用传统并网电流 HPF 反馈控制策略时,系统会随着电网阻抗的增大而失去稳定。相反,所提出的改进的控制策略具有很好的稳定性和鲁棒性,有效地提高电网阻抗在较大范围内变化时的系统适应性。

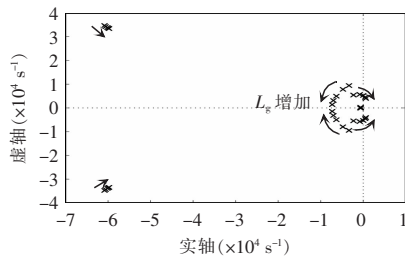


图 10 采用 HPF 控制策略时系统主导极点分布

Fig. 10 Distribution of dominant poles of system under the HPF control strategy

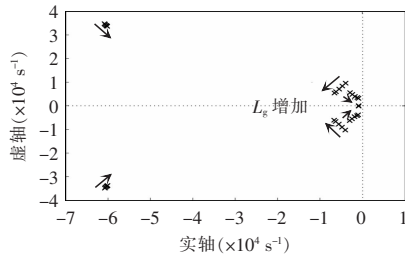


图 11 采用改进控制策略时的主导极点分布

Fig. 11 Distribution of dominant poles under the improved control strategy

### 3.2 改进控制方法的实验处理

为了在实验平台上验证该策略,需要对算法进行离散化。采用 Tustin<sup>[16]</sup>方法对控制算法部分进行离散化,相应的离散模型控制框图如图 12 所示。

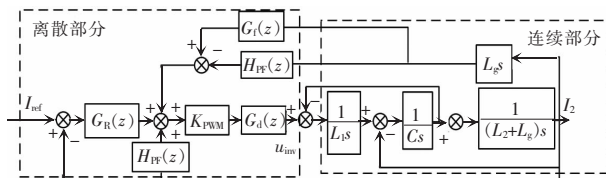


图 12 系统传递函数

Fig. 12 Transfer function of system

根据 Tustin 的离散化方法,将式(3)的离散化表达式推导为

$$G_R(z) = K_p + K_{ri} \omega_c T (z^2 - 1) \left/ \left[ \left( \omega_c T + \frac{1}{4} T^2 \omega^2 + 2 \right) z^2 + \left( \frac{1}{2} T^2 \omega^2 - 2 \right) z + \left( 1 - \omega_c T + \frac{1}{4} T^2 \omega^2 \right) \right] \right. + \sum_{m=1}^3 \omega_m T (z^2 - 1) \left/ \left[ \left( 2\omega_i T + \frac{1}{2} A T^2 \omega^2 \right) z^2 + (A T^2 \omega^2 - 4) z + \left( 2 - 2\omega_i T + \frac{1}{2} A T^2 \omega^2 \right) \right] \right. \quad (10)$$

HPF 的离散化表达式推导为

$$H_{PF}(z) = \frac{z(1+k)}{(0.5T\omega+1)z+(0.5T\omega-1)} \quad (11)$$

式中:  $T_s$  为控制周期;  $A = (2m+1)^2$ 。值得注意的是,  $H_{PF}(z)$  中的  $k$  可以赋值为  $k_1$  和  $k_2$ 。

## 4 仿真与实验验证

### 4.1 仿真实验

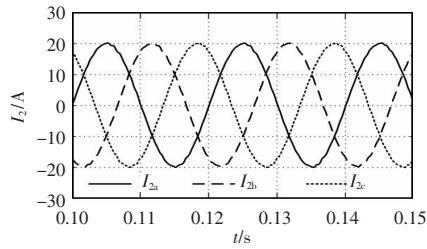
利用基于 Matlab/Simulink 的三相并网逆变器仿真模型,对两种控制策略进行验证比较。仿真参数如表 1 所示。为了模拟实际电网中的高次谐波,在仿真中的电网电源中加入了 5% 的 3 次,4% 的 5 次,3% 的 7 次和 2% 的 9 次谐波。图 13 和图 14 是两种控制策略在不同  $L_g$  时的电流仿真波形。

表 1 仿真参数

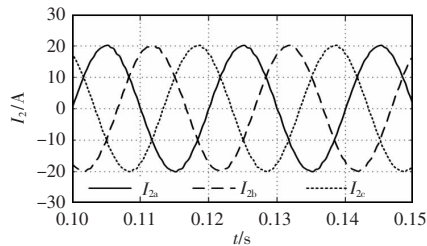
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流电压 $U_{dc}/V$	180	电网电压 $u_g/V$	100
滤波电感 $L_1/mH$	3	电网电压频率 $f_0/Hz$	50
滤波电容 $C/\mu F$	10	采样频率 $f_s/kHz$	30
滤波电感 $L_2/mH$	1	开关频率 $f_{sw}/kHz$	15
比例系数 $K_p$	100	3th 谐振系数	95
基频谐振系数 $K_{r1}$	0.6	5th 谐振系数	95
截止带宽 $\omega_c$	3.14	7th 谐振系数	80
谐振深度 $\omega_r$	15	9th 谐振系数	70

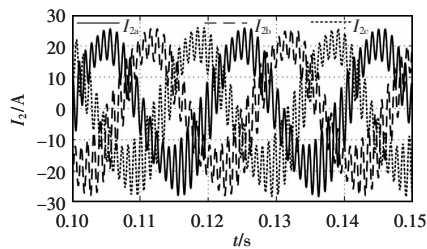
由图 13(a)和图 13(b)可知,在  $L_g$  为 0 mH 时,两种控制方法都能保持系统稳定,并且差异不大,这是因为两种控制策略在理想电网时是等效的。然而在弱电网环境下,  $L_g$  增加到 3 mH 时,如图 14(a)



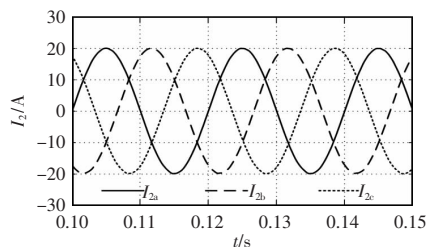
(a)传统的 HPF 反馈控制策略(THD=1.24%)



(b)改进的 HPF 控制策略(THD=1.20%)

图 13  $L_g=0$  mH 时两种策略波形Fig. 13 Waveforms under two strategies when  $L_g=0$  mH

(a)传统的 HPF 控制策略(THD=40.91%)



(b)改进的 HPF 控制策略(THD=0.87%)

图 14  $L_g=3$  mH 时两种策略波形Fig. 14 Waveforms under two strategies when  $L_g=3$  mH

和(b)所示,使用并网电流 HPF 反馈有源阻尼策略的并网电流出现失真,并且总谐波失真 THD(total harmonic distortion)为 40.91%,这说明系统已经失稳。但是使用改进的控制策略时,系统依旧能保持稳定,THD 仅为 0.87%,这与理论分析是一致的。

#### 4.2 实验验证

为了验证本文所提控制策略的正确性和有效

性,依据图 1 在实验室中搭建了相应的三相桥式并网逆变器实验平台,整体的实验样机如图 15 所示。

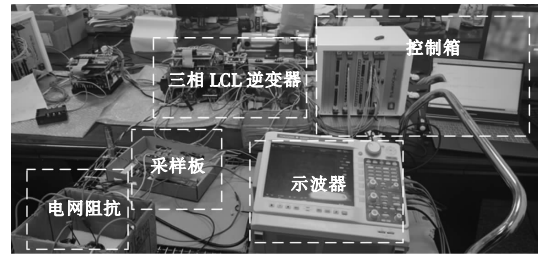
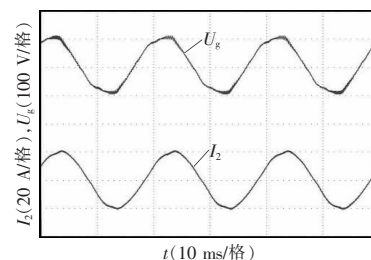


图 15 实验样机图片

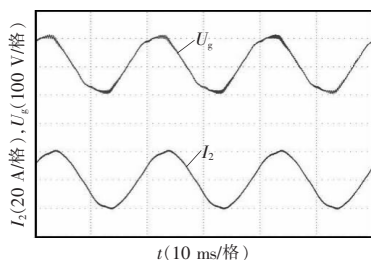
Fig. 15 Photo of experimental prototype

其中三相并网逆变器采用的是 Mayway 公司的三相桥式逆变器 MWINV-9R144,采用的控制芯片为 TMS320C6657,是一款高性能定点/浮点 DSP 处理器,主频高达 1.25 GHz,处理能力强。直流侧通过变压器与三相电源连接,电网侧通过变压器直接与电网电压相连。LCL 滤波器的参数和控制参数与表 1 中参数相同,其中控制延时  $T_s \approx 0.05$  ms。在实验中,通过在电网侧串联一定感值的电感来模拟电网阻抗  $L_g$ 。电流采样是将导线顺时针绕过型号为 PBT-GF30 的电流传感器进行信号采集,耦合点电压则是一根地线与三根测量线接入型号为 LV25-P712164 的电压互感器进行信号采集,之后将采集到的信号送到控制箱中。采集为保证并网安全性,通过程序判断锁相是否成功,从而发出并网信号导通继电器,实现三相 LCL 逆变器并网。

对比图 16 与图 17 可知,实验波形同样验证了改进控制策略的优越性。由图 16(a)、图 16(b)可知,两种控制策略在无电网阻抗,即无穷大电网时,系统也能保持稳定运行,并且谐波较少。如图 17(a)所示,当  $L_g=3$  mH,采用电网电流 HPF 反馈策略时,并网电流出现了大量的谐波。而采用本文改进的控



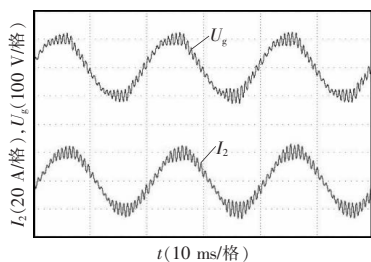
(a)传统的 HPF 控制策略



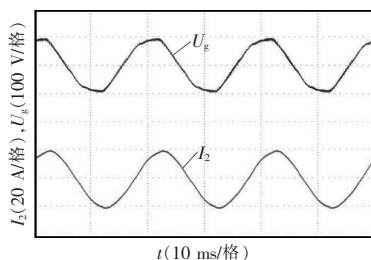
(b)改进的 HPF 控制策略

图 16  $L_g=0$  mH 时两种策略实验

Fig. 16 Experimental under two strategies when

 $L_g=0$  mH

(a)传统的 HPF 控制策略



(b)改进的 HPF 控制策略

图 17  $L_g=3$  mH 时两种策略实验

Fig. 17 Experimental under two strategies when

 $L_g=3$  mH

制策略,如图 16(b)和 17(b)所示,从 0-3 mH 乃至更大电抗都有效,弱电网的实用范围增加,系统的稳定性得到提高,对谐波的抑制能力提升,并网电流质量有了良好的改善。

## 5 结论

针对弱电网环境下的并网 LCL 滤波器逆变器,提出了基于并网点电压和并网电流反馈的改进有源阻尼方法。

通过仿真与基于并网逆变器原型的实验结果证明,与传统的并网电流 HPF 控制方法相比,该策

略不仅保持了节约传感器的优点,而且在电网阻抗大范围变化时都具有很好的稳定性,有效抑制了并网电流谐波。

在未来的工作中,本方法还可以与电网阻抗检测法相结合,自适应调整 HPF 的参数,进一步提高系统的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] 张梦帆,傅明月,陈新. 基于比例积分谐振的微网逆变器电压均衡控制策略研究[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 86-94. Zhang Mengfan, Fu Mingyue, Chen Xin. Voltage balance control strategy for microgrid inverter based on proportional integral resonance [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 86-94 (in Chinese).
- [2] Daly P A, Morrison J. Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems [C]// 2001 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 45th Annual Conference. Arkansas, USA, 2001: A2/1-13.
- [3] 施家博,苗虹,曾成碧. 基于复合型虚拟阻抗与自适应下垂控制的并联逆变器功率均分策略[J/OL]. 电测与仪表, 2021: 1-7. (2020-09-30)[2021-05-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20200929001&uniplatform=NZKPT&v=hy3CJkzDUKSyZQwjYukgwbwANaC6NUaL5sztJJgu8juuOPQNKVrSqXqSFd7PkudQ>. Shi Jiabo, Miao Hong, Zeng Chengbi. Power sharing strategy of parallel inverter based on compound virtual impedance and adaptive droop control [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021: 1-7. (2020-09-30)[2021-05-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20200929001&uniplatform=NZKPT&v=hy3CJkzDUKSyZQwjYukgwbwANaC6NUaL5sztJJgu8juuOPQNKVrSqXqSFd7PkudQ> (in Chinese).
- [4] Xu Jinming, Xie Shaojun. LCL-resonance damping strategies for grid connected inverters with LCL filters: A comprehensive review [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(2): 292-305.
- [5] Peña-Alzola R, Liserre M, Blaabjerg F. Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 6: 2642-2646.

- [6] 许津铭, 谢少军, 唐婷. 弱电网下 LCL 滤波并网逆变器自适应电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4031-4039.  
Xu Jinming, Xie Shaojun, Tang Ting. An adaptive current control for grid-connected LCL-filtered inverters in weak grid case [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039 (in Chinese).
- [7] 杨树德, 同向前, 尹军, 等. 增强并网逆变器对电网阻抗鲁棒稳定性的改进前馈控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 222-230, 240.  
Yang Shude, Tong Xiangqian, Yin Jun, et al. An improved grid voltage feedforward strategy for grid-connected inverter to achieve high robust stability against grid-impedance variation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 222-230, 240 (in Chinese).
- [8] Sosa J M, Martinez-Rodriguez P R, Escobar G, et al. Analysis and validation for an inverter-side current controller in LCL grid-connected power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 2(8): 387-398.
- [9] Zhou Xinda, Lu Shuai. A novel inverter-side current control method of LCL -filtered inverters based on high-pass-filtered capacitor voltage feedforward [J]. IEEE Access, 2020, 10(8): 16528-16538.
- [10] Hanif M, Khadkikar V, Xiao Weidong. Two degrees of freedom active damping technique for LCL filter-based grid connected PV systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2795-2803.
- [11] Xu Jinming, Xie Shaojun, Tang Ting. Active damping-based control for grid-connected LCL -filtered inverter with injected grid current feedback only [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746-4758.
- [12] 周鹏, 张新燕, 岳家辉, 等. 三相 LCL 并网逆变器自带低通滤波功能的复合控制方法 [J/OL]. 电源学报: 1-16. (2020-06-03) [2021-05-21]. [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20200602002&uniplatform=NZKPT&v=13djmswXqZUKTSad6ZuXFNvnA8KD8KZDsIR1IGchaF0Hmy4bVd8rwTaDaOJCj\\_y](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20200602002&uniplatform=NZKPT&v=13djmswXqZUKTSad6ZuXFNvnA8KD8KZDsIR1IGchaF0Hmy4bVd8rwTaDaOJCj_y)  
Zhou Peng, Zhang Xinyan, Yue Jiahui, et al. Composite control method for three-phase lcl grid-connected inverter with low-pass filtering function [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-16. (2020-06-03)[2021-05-21]. [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20200602002&uniplatform=NZKPT&v=13djmswXqZUKTSad6ZuXFNvnA8KD8KZDsIR1IGchaF0Hmy4bVd8rwTaDaOJCj\\_y](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DYXB20200602002&uniplatform=NZKPT&v=13djmswXqZUKTSad6ZuXFNvnA8KD8KZDsIR1IGchaF0Hmy4bVd8rwTaDaOJCj_y) (in Chinese).
- [13] 王颖杰, 王文超, 李炎, 等. LCL 型并网变换器 PCC 点电压反馈有源阻尼控制策略[J]. 电气传动, 2017, 47(2): 29-34.  
Wang Yingjie, Wang Wenchao, Li Yan, et al. PCC voltage feedback active damping control strategy for grid-connected converter with LCL filter [J]. Electrical Drive, 2017, 47(2): 29-34 (in Chinese).
- [14] 冯婷婷, 周平, 唐立波, 等. 数字控制下 LCL 型并网逆变器的环路滞后补偿方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 109-114, 121.  
Feng Tingting, Zhou Ping, Tang Libo, et al. A method of loop lag compensation for LCL-type grid-connected inverters under digital control [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 109-114, 121 (in Chinese).
- [15] 曹子恒, 肖先勇, 李媛, 等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的自适应改进前馈控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1560-1570.  
Cao Ziheng, Xiao Xianyong, Li Yuan, et al. Adaptive novel feed-forward control strategy for LCL type grid-connected inverters in the weak grid [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1560-1570 (in Chinese).
- [16] 宋保业, 许琳, 卢晓. 基于 Tustin 变换的分数阶微分算子近似离散化[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(13): 92-95+102.  
Song Baoye, Xu Lin, Lu Xiao. Discrete Approximation of Fractional-order Differentiator Based on Tustin Transfo [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(13): 92-95+102 (in Chinese).



王翰文

## 作者简介:

王翰文(1996-),男,硕士研究生。研究方向:微电网并网逆变器控制技术。E-mail:976898554@qq.com。

曾成碧(1969-),女,博士,硕士生导师,教授。研究方向:新能源及智能优化控制等光伏发电技术。E-mail:857606631@qq.com。

苗虹(1971-),女,通信作者,博士,副教授。研究方向:分布式发电和微电网技术等。E-mail:1604681549@qq.com。