

# 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究 及新型有源阻尼控制

陈 新 韦 徵 胡雪峰 陈轶涵 龚春英

(南京航空航天大学江苏省新能源发电与电能变换重点实验室 南京 210016)

**摘要** 相比较传统的 L 型滤波器, LCL 滤波器以其较低的成本和更好的高次滤波衰减能力适合应用于大功率场合下的三相并网逆变器。文章详细分析了根据逆变器电压电流传感器安装位置不同导致网侧等效阻抗的变化以及对并网逆变器采用不同电流控制方式时的系统稳定性。针对 LCL 滤波器本身存在的谐振问题以及传统的增加滤波器无源阻尼电阻会带来系统额外的功率损耗, 降低变流器效率等缺点, 文章通过建立基于 LCL 滤波器滤波电容串联和并联阻尼电阻的系统控制模型, 构建系统传递函数并利用系统传函等效原则, 选择滤波电容电压前馈分别实现基于有源虚拟阻尼电阻串联和并联的 LCL 滤波器系统控制方案, 给出前馈系数计算方法。最后通过仿真和实验验证了采用基于有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制策略, 仿真和实验结果表明在不增加系统额外功率损耗的同时, 逆变器并网电流工作稳定且谐波含量低。

**关键词:** 并网逆变器 稳定性分析 LCL 滤波器 有源虚拟阻尼电阻 控制策略

**中图分类号:** TM641; TM46

## Research on LCL Filter in Three-Phase Grid-Connected Inverter and Novel Active Damping Control Strategy

Chen Xin Wei Zheng Hu Xuefeng Cen Yihan Gong Chunying

(Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016 China)

**Abstract** Compared with the traditional L type filter, LCL type filter is more suitable for three-phase grid-connected inverter which used in the high-power because of its lower cost and good performance in harmonic suppression. The variation of net impedance is analyzed according to the different positions of voltage and current sensors in the inverter. The stabilization analysis of system is also discussed on the paper in different current control ways. To the question of resonance in the LCL filter and the application of passive damped resistor will cause the power loss and affect the system efficiency, the system control models and transfer functions which based LCL filter capacitor-series and parallel damped resistor are constructed. According to the principle of equivalent function, the system control strategy which based on LCL filter capacitor-series and parallel active virtual damped resistor is obtained with the feedback of filter capacitor voltage on this paper. The control strategy which based on LCL filter capacitor-parallel active virtual damped resistor is verified in the Matlab/Simulink and experiment. The results of simulation and experiment show the current of grid is stabilization and low THD, and the system power loss is not increased at the same time.

**Keywords:** Grid-connected inverter, stabilization analysis, LCL filter, active virtual damped resistor, control strategy

江苏省新能源发电与电能变换重点实验室开放研究基金, 光宝电力电子技术科研基金和江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20131360)资助项目。

收稿日期 2012-09-20 改稿日期 2013-08-13

## 1 引言

根据国家发展新能源规划和建设智能电网要求, 新能源的发电并网成为未来国家节能减排, 电力系统能源补充的一个重要发展趋势。并网逆变器一般采用高频 PWM 调制, 导致产生大量的高次谐波电流进入电网从而造成对电网的谐波污染, 对电网的稳定运行不利, 因此需要在并网逆变器与电网之间加入滤波设备。与传统的变流器并网侧加入 L 型滤波器相比, LCL 构成的三阶滤波器具有更好的高次谐波衰减能力, 可以在总电感值比 L 型滤波器电感值小很多的条件下, 实现相同的滤波效果, 尤其适合开关频率相对较低的大功率应用场合<sup>[1-5]</sup>。但是 LCL 滤波器本身存在谐振问题, 如果滤波器设计及控制策略不合适, 会导致系统的不稳定。为了提高系统的稳定性, 文献[6,7]采取了增加滤波器无源阻尼的方式, 但是阻尼电阻会带来额外的功率损耗, 不适合应用在大功率系统中。因此, 在解决 LCL 滤波器谐振的同时, 又不会给系统带来功率损失的有源阻尼方式获得广泛的关注<sup>[8-15]</sup>。

本文首先根据三相并网逆变器电压电流传感器检测位置的不同分析了网侧等效阻抗的变化, 讨论了采用不同电流控制方式对系统稳定性的影响, 指出基于逆变器机侧电流控制方式的系统稳定性要优于网侧电流控制, 但会导致网侧功率因数的下降。文献[16-20]深入讨论了采用无源阻尼控制方式的 LCL 滤波器参数设计方法。本文在无源阻尼控制 LCL 滤波器参数设计的基础上, 推导了当采用网侧电流控制方式时, 无源阻尼电阻并联和串联 LCL 滤波的系统传递函数并利用系统传递函数等效原则, 选择滤波电容电压前馈分别实现基于有源虚拟阻尼电阻串联和并联 LCL 滤波的系统控制方法。该方法通过对系统控制算法的改进, 在不增加系统功率损耗的同时获得了与传统采用无源阻尼 LCL 滤波器同样的滤波效果, 最后通过仿真和实验验证了该控制策略的正确性和可行性。

## 2 并网逆变器的电路分析

### 2.1 主电路拓扑

图 1 所示为三相并网逆变器拓扑结构图。图中  $i_{dc}$  为新能源输入直流电流,  $C_1$  为输入直流母线滤波电容,  $Q_1 \sim Q_6$  为三相逆变器的 6 个 IGBT 开关管,  $R_1$  为机侧滤波电感  $L_1$  的内阻和由电路工作时产生的线路损耗,  $R_2$  为网侧滤波电感  $L_2$  的内阻,  $L_1$ 、 $L_2$ 、

$C$  组成 LCL 滤波器。

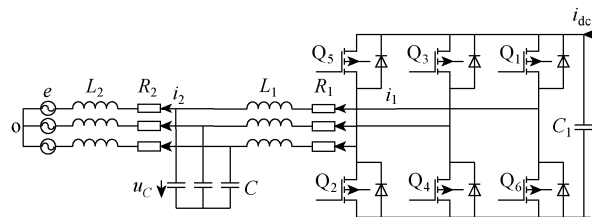


图 1 三相并网逆变器拓扑结构图

Fig.1 Three-phase grid-connected inverter topology

### 2.2 LCL 滤波器性能分析

为了研究方便, 取 LCL 滤波器的单相等效电路进行研究。根据阻尼电阻安装位置, 分为与滤波电容串联连接和并联连接两种。将逆变器侧输出电压和电网电压分别用电压源  $u$ 、 $e$  表示, 则系统单相电路拓扑如图 2 所示。

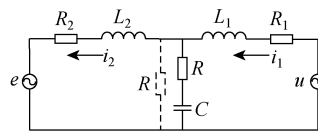


图 2 LCL 滤波器单相等效电路

Fig.2 LCL-filter single-phase equivalent circuit

当没有安装阻尼电阻时, 逆变器侧输出电压到电网线电流传递函数为

$$H_1(s) = \frac{I_2(s)}{U(s)} = \frac{1}{(sL_2 + R_2)(1 + sCR_1 + s^2L_1C) + sL_1 + R_1} \quad (1)$$

当阻尼电阻串联滤波电容时, 逆变器侧输出电压到电网线电流传递函数为

$$H_2(s) = \frac{sCR + 1}{(s^2L_2C + sCR_2 + sCR + 1)(sL_1 + R_1) + (sL_2 + R_2)(sCR + 1)} \quad (2)$$

当阻尼电阻并联滤波电容时, 逆变器侧输出电压到电网线电流传递函数为

$$H_3(s) = \frac{R}{(sL_2 + R_2)(s^2L_1CR + sCR_1R + sL_1 + R_1 + R) + (sL_1 + R_1)R} \quad (3)$$

根据传递函数  $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$  和  $H_3(s)$  画出相应的伯德图, 如图 3 所示。从中可以看出  $H_1(s)$  的伯德图上在谐振频率  $f_{res} = \sqrt{(L_1 + L_2)/L_1L_2C}/2\pi$  处存在一个高于 0dB 的谐振峰值, 从而导致谐振频率处的谐波幅值增大, 进而增加了电网线电流的高次谐波

含量。当采用滤波电容串联或并联阻尼电阻时,从  $H_2(s)$ 、 $H_3(s)$  的伯德图上可以看出谐振频率处的谐振峰值明显得到抑制,有助于改善 LCL 滤波器的滤波效果,但是阻尼电阻的增加会带来系统功率额外的损耗,降低系统效率。

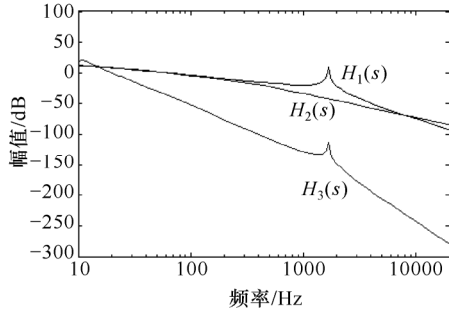


图 3 不同阻尼电阻连接方式下 LCL 滤波器的伯德图

Fig.3 Bode diagram of LCL filter with damped resistor in different positions

### 3 不同电压电流检测方式下网侧阻抗和系统稳定性分析

#### 3.1 网侧阻抗分析

文献[16]分析了当三相并网逆变器工作在整流模式下,由于电压电流检测传感器位置放置的不同,若控制上使所测电流与电压保持同相位(忽略电路功率损耗),从网侧看入的等效阻抗的变化。同理,当变换器工作在逆变并网模式下时,根据检测传感器位置的不同,从网侧看入的等效阻抗也将产生变化。三相并网逆变器电压电流检测传感器位置放置共有四种情况。

##### 3.1.1 检测滤波电容电压 $u_C$ 和机侧电流 $i_1$

控制上使得电容电压  $u_C$  和机侧电流  $i_1$  同相位,令  $Z_b$  为基准阻抗,则

$$Z_b = \frac{U_C}{I_1} \quad (4)$$

网侧等效阻抗如图 4a 所示,即

$$\begin{aligned} Z_{\text{grid}} &= \frac{X_2 X_C - j(X_2 - X_C)Z_b}{Z_b + jX_C} \\ &= \frac{Z_b X_C^2 - j[X_2 X_C^2 + (X_2 - X_C)Z_b^2]}{Z_b^2 + X_C^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $X_1 = \omega L_1$ ,  $X_2 = \omega L_2$ ,  $X_C = 1/\omega C$ 。

由式(5)可以推导出,当  $X_C \sqrt{\frac{X_2}{X_C - X_2}} = Z_b$  时,

网侧等效阻抗呈纯阻性。

##### 3.1.2 检测滤波电容电压 $u_C$ 和网侧电流 $i_2$

控制上使得电容电压  $u_C$  和网侧电流  $i_2$  同相位,则

$$Z_b = \frac{U_C}{I_2} \quad (6)$$

网侧等效阻抗

$$Z_{\text{grid}} = Z_b - j\omega L_2 \quad (7)$$

由此可见,当检测滤波电容电压  $u_C$  和网侧电流  $i_2$  时,网侧等效阻抗呈容性。电路表现为电容(容值为  $1/\omega^2 L_2$ )与基准阻抗串联,如图 4b 所示。

##### 3.1.3 检测电网电压 $e$ 和网侧电流 $i_2$

控制上使得电网电压  $e$  和网侧电流  $i_2$  同相位,令  $Z_b$  为基准阻抗,则

$$Z_b = \frac{E}{I_2} = Z_{\text{grid}} \quad (8)$$

由此可见,网侧等效阻抗呈纯阻性,如图 4c 所示。

##### 3.1.4 检测电网电压 $e$ 和机侧电流 $i_1$

控制上使得电网电压  $e$  和机侧电流  $i_1$  同相位,令  $Z_b$  为基准阻抗,则

$$Z_b = \frac{E}{I_1} \quad (9)$$

网侧等效阻抗为

$$Z_{\text{grid}} = \frac{E}{I_1 - I_C} \quad (10)$$

结合电网电压、逆变器交流侧输出电压、机侧滤波电感电流、滤波电容电流、网侧滤波电感电流各空间矢量的关系

$$E = U - jX_1 I_1 - jX_2 I_2 \quad (11)$$

$$I_C = \frac{U - jX_1 I_1}{-jX_C} \quad (12)$$

联立式(10)~式(12)可得

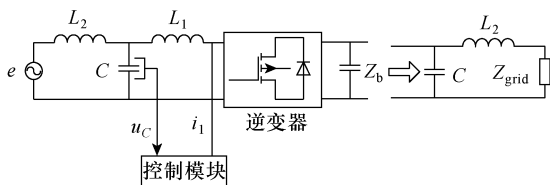
$$Z_{\text{grid}} = \frac{Z_b jX_C}{Z_b + jX_C} \quad (13)$$

由此可见,当检测电网电压  $e$  和机侧电流  $i_1$  时,网侧等效阻抗呈感性。电路表现为电感(感值为

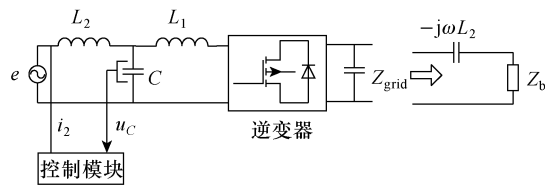
$1/(\omega^2 C)$  与基准阻抗并联, 如图 4d 所示。

由上述分析可以得知, 理论上, 当电压电流传感器采用图 4a 和图 4c 放置方式时均可以满足网侧单位功率因数的要求。但事实上, 由于三相并网逆变器普遍采用同步旋转坐标系下的空间矢量控制方式, 需要通过检测电网电压信号来确定同步旋转坐标系 d 轴的位置, 而电容电压较实际电网电压存在相位偏差以及畸变, 影响同步旋转坐标系 d 轴的定位, 因此电压传感器通常放置在网侧<sup>[19]</sup>。

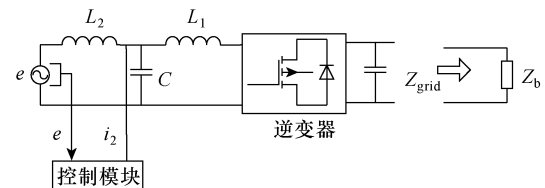
当采用图 4d 所示的机侧电感电流检测方式时, 由于此时网侧阻抗呈感性, 故会导致并网电流相位滞后于电网电压从而产生功率因数损失。当  $1/(\omega^2 C)$  越大, 即滤波电容取值越小, 功率因数越接近于 1。为了不影响 LCL 滤波器滤波效果, 滤波电容取值减小会增大 LCL 滤波器电感值的选取, 从而不利于降低系统成本<sup>[20]</sup>。



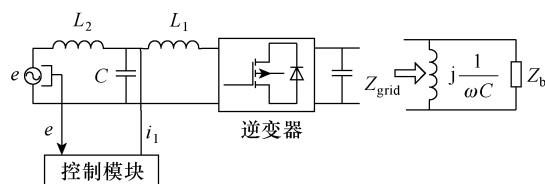
(a) 检测电容电压和机侧电流



(b) 检测电容电压和网侧电流



(c) 检测网侧电压和网侧电流



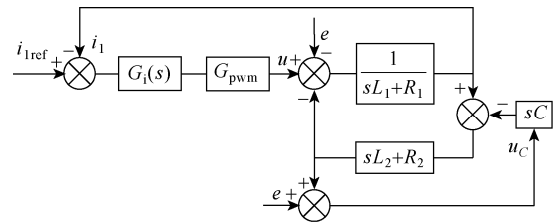
(d) 检测网侧电压和机侧电流

图 4 电压电流传感器安装位置及其网侧等效阻抗

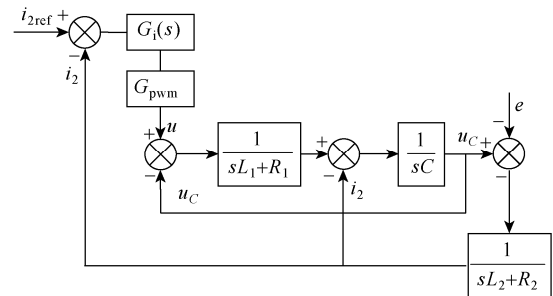
Fig.4 Different positions of voltage and current sensors and the equivalent impedance of net

### 3.2 系统稳定性分析

根据常规的检测电网电压信号, 不考虑增加 LCL 滤波器无源阻尼电阻时, 分别对三相并网逆变器采取机侧电流控制和网侧电流控制, 系统控制框图分别如图 5a、图 5b 所示。图中  $G_i(s)$  为电流环 PI 控制器传递函数,  $G_{pwm}$  为逆变器主电路等效比例放大环节。



(a) 采用机侧电流控制



(b) 采用网侧电流控制

图 5 不同电流控制方式下的系统控制框图

Fig.5 Control diagram of system in different current control ways

采用机侧电流控制时, 系统机侧电流环增益为

$$T_1(s) = \frac{G_i(s)G_{pwm}(s^2CL_2 + sCR_2 + 1)}{(s^2L_2C + sCR_2 + 1)(sL_1 + R_1) + sL_2 + R_2} \quad (14)$$

采用网侧电流控制时, 系统网侧电流环增益为

$$T_2(s) = \frac{G_i(s)G_{pwm}}{(s^2L_1C + sCR_1 + 1)(sL_2 + R_2) + sL_1 + R_1} \quad (15)$$

利用 Matlab 软件计算出两种电流控制方式下的电流环增益伯德图, 如图 6 所示。从伯德图中可以看出, 当采用机侧电流控制方式时, 存在  $35^\circ$  左右相位裕度, 系统稳定; 采用网侧电流控制方式时, 幅值裕度为负值, 系统稳定性较差。从而表明, 对不增加阻尼电阻 LCL 滤波的三相并网逆变器实行机侧电流控制时, 其系统稳定性要优于网侧电流控制。

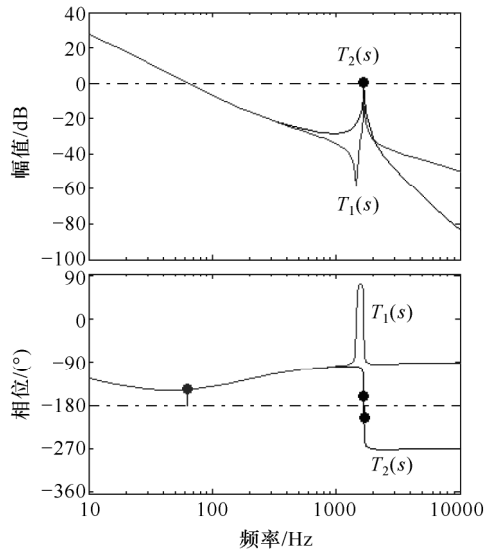


图 6 不同控制方式下的电流增益伯德图

Fig.6 Current gain Bode plots in different control ways

综合上述分析,在检测电网电压的基础上,基于机侧电流控制的无阻尼 LCL 滤波三相并网逆变器系统稳定性要优于网侧电流控制方式,但是此时网侧阻抗呈感性,故导致该控制方式下的网侧功率因数下降。

#### 4 无源阻尼 LCL 滤波的三相并网逆变器控制

由于采用检测电网电压和网侧电流控制方法时,网侧等效阻抗呈纯阻性,故以下分析均建立在此种控制方法的基础上。

##### 4.1 基于无源阻尼电阻串联 LCL 滤波

基于无源阻尼电阻串联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制框图如图 7 所示。

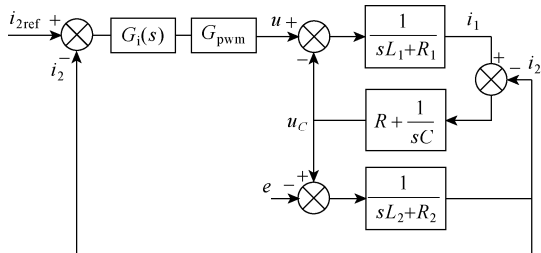


图 7 阻尼电阻串联 LCL 滤波的系统控制框图

Fig.7 Control diagram of system with series damped resistor

系统开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{G_i(s)G_{pwm}(sCR+1)}{\Delta_1} \quad (16)$$

$$\Delta_1 = (sL_2 + R_2)(s^2L_1C + sCR_1 + sCR + 1) + (sL_1 + R_1)(sCR + 1)$$

##### 4.2 基于无源阻尼电阻并联 LCL 滤波

基于无源阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制框图如图 8 所示。

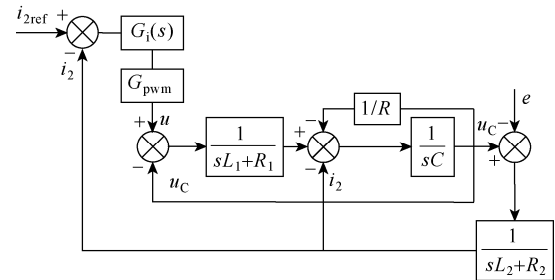


图 8 阻尼电阻并联 LCL 滤波的系统控制框图

Fig.8 Control diagram of system with parallel damped resistor

系统开环传递函数为

$$G_2(s) = \frac{G_i(s)G_{pwm}R}{\Delta_2} \quad (17)$$

$$\Delta_2 = (sL_2 + R_2)(s^2L_1CR + sCR_1R + sL_1 + R_1 + R) + (sL_1 + R_1)R$$

#### 5 有源阻尼 LCL 滤波的三相并网逆变器控制

根据图 7、图 8 所示的分别采用无源阻尼电阻串联和并联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制框图,对其进行等效变换,在去除相应的阻尼电阻分量同时,从中选取滤波电容电压并乘以合适的前馈系数,将其叠加到网侧电流控制器的输出端,从而获得如图 9 和图 10 所示的对应的控制框图。根据传递函数等效原则,可以计算出滤波电容电压的前馈系数。

##### 5.1 基于虚拟阻尼电阻串联 LCL 滤波

基于虚拟阻尼电阻串联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制框图如图 9 所示。

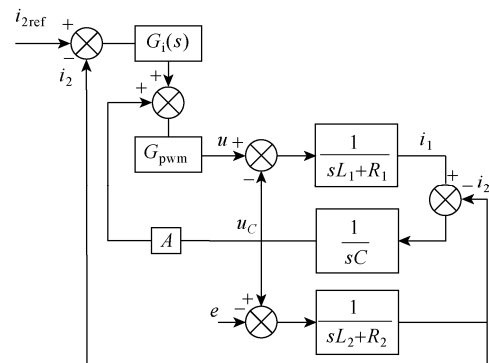


图 9 虚拟阻尼电阻串联 LCL 滤波的系统控制框图

Fig.9 Control diagram of system with virtual series damped resistor

系统开环传递函数为

$$G_3(s) = \frac{G_1(s)G_{\text{pwm}}}{A_3} \quad (18)$$

$$A_3 = (sL_2 + R_2)(s^2L_1C + sCR_1 - AG_{\text{pwm}} + 1) + sL_1 + R_1$$

综合式 (14), 由  $G_1(s) = G_3(s)$  可得

$$A = \frac{s^2C^2R(sL_1 + R_1)}{(sCR + 1)G_{\text{pwm}}} \quad (19)$$

## 5.2 基于虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波

基于虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制框图如图 10 所示。

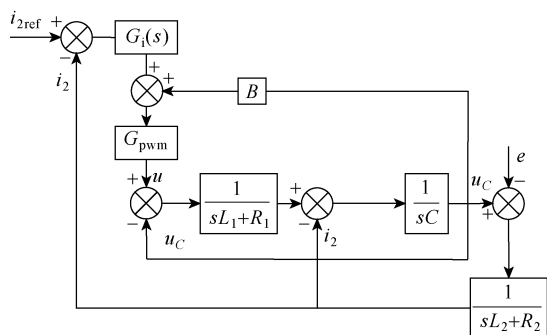


图 10 虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的系统控制框图  
Fig.10 Control diagram of system with virtual parallel damped resistor

系统开环传递函数为

$$G_4(s) = \frac{G_1(s)G_{\text{pwm}}}{A_4} \quad (20)$$

$$A_4 = (sL_2 + R_2)(s^2L_1C + sCR_1 - BG_{\text{pwm}} + 1) + sL_1 + R_1$$

综合式 (15), 由  $G_2(s) = G_4(s)$  可得

$$B = -\frac{sL_1 + R_1}{RG_{\text{pwm}}} \quad (21)$$

根据上述分析, 当采用有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器控制方案时, 滤波电容电压前馈系数简单, 控制算法实现方便, 因此系统仿真及实验中采用该方案予以验证。

## 6 系统仿真及实验验证

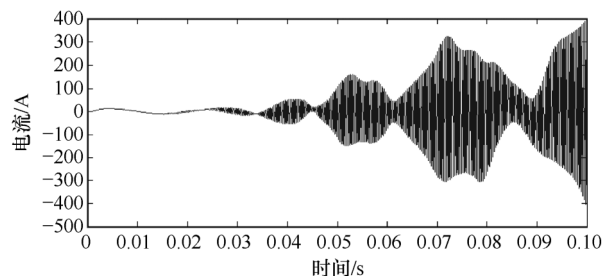
根据文献[16-19]所述的无源阻尼 LCL 滤波器参数设计方法, 对三相并网逆变器设计好相应的含无源阻尼电阻并联的滤波器参数, 然后由式 (21) 计算出采用虚拟电阻并联 LCL 滤波方案的电容电

压前馈系数, 最后根据如图 10 所示的控制框图获得基于有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器的控制策略。

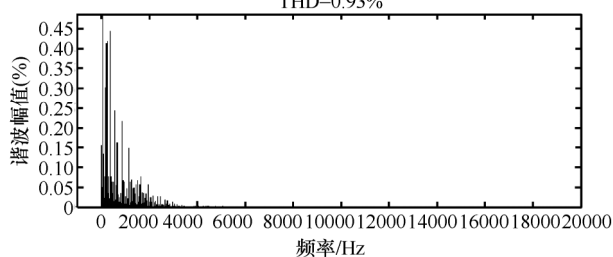
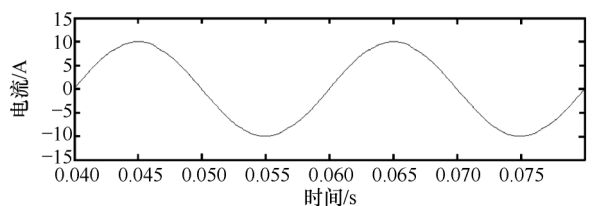
仿真及实验中三相并网逆变器系统参数为: 输入直流母线电压 600V, 开关频率 20kHz, 并网电流峰值为 10A。LCL 滤波器机侧滤波电感  $L_1$  为 1.8mH, 电路功率损耗等效电阻  $R_1$  为 0.2Ω、网侧滤波电感  $L_2$  为 0.6mH, 内阻  $R_2$  为 0.15Ω, 滤波电容 5μF, 并联虚拟阻尼电阻  $R$  为 10Ω。

图 11a 为未采用阻尼电阻时, 三相并网逆变器其中一相并网电流仿真波形, 从中可以看出当未采用阻尼电阻的 LCL 滤波时, 逆变器并网电流产生明显震荡, 系统处于不稳定工作状态。

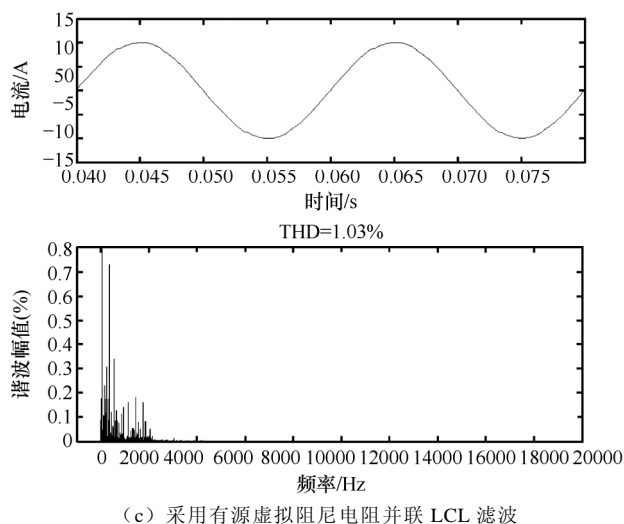
图 11b~图 11c 分别为采用无源并联阻尼电阻以及采用有源虚拟并联阻尼电阻 LCL 滤波器时, 三相并网逆变器其中一相并网电流仿真波形及其频谱分析。当采用无源并联阻尼电阻时, 网侧电流正弦度好、波形稳定。当采用有源虚拟阻尼电阻并联时, 网侧电流波形振荡现象同样得到抑制, 频谱分析显示谐振频率附近的谐波含量低, 说明根据文中所提出的引入滤波电容电压前馈有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波器对于高次谐波的滤波效果很好, 且没有给系统带来额外的功率损耗。



(a) 未采用阻尼电阻 LCL 滤波



(b) 采用无源阻尼电阻并联 LCL 滤波



(c) 采用有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波  
图 11 不同控制方式下, LCL 滤波的逆变器  
并网电流波形及频谱

Fig.11 LCL-filter-based inverter output current waveforms in different control strategies

为进一步验证文章所提出的有源虚拟阻尼控制策略的正确性,图 12 给出了有源虚拟阻尼控制投入时的动态仿真波形,在仿真时间  $t < 0.03s$  时,虚拟阻尼不投入,此时系统处于无阻尼电阻工作状态。 $t > 0.03s$  时,虚拟阻尼控制策略开始工作。仿真波形表明,在投入虚拟阻尼控制策略之后,系统在一个电网周期之后消除了谐振现象并迅速进入稳定工作状态,从而进一步证明本文所提出的有源虚拟阻尼控制策略的正确性。

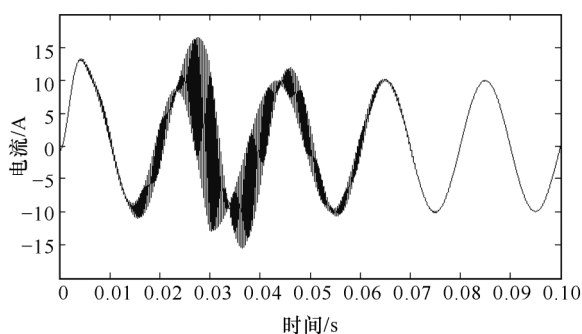
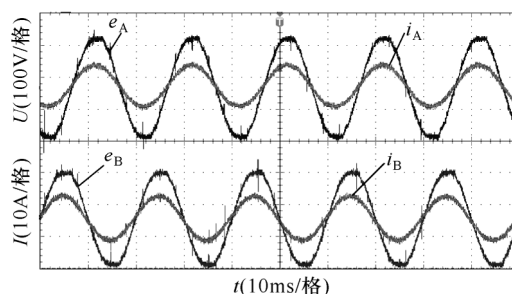


图 12 有源虚拟阻尼控制策略投入动态波形

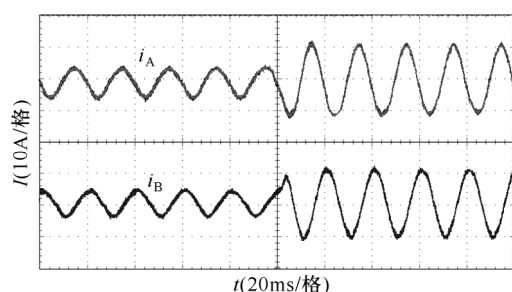
Fig.12 The dynamic waveform of active damping control strategy

根据上述原理,在实验室搭建了以 DSP(Digital Signal Processor) TMS320F2812 为控制核心的基于有源虚拟阻尼电阻并联的 LCL 滤波的三相并网逆变器实验样机。其中图 13a 为并网电流与电网电压的稳态实验波形,利用功率分析仪测得 A 相电流的 PF 为 0.998, THD 为 3.3%, B 相电流的 PF 为 0.996, THD 为 3.5%, C 相电流的 PF 为 0.993, THD 为 3.6%;

图 13b 为并网电流峰值由 5A 突变至 10A 时的变换器动态实验波形,从中可以看出系统具有较快的动态响应能力。实验结果表明采用本文控制策略时,基于有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器既能获得很好的稳态入网电流波形质量和较高的功率因数,同时具有良好的动态性能。



(a) 系统稳态波形



(b) 系统动态波形

图 13 本文控制策略下的实验波形

Fig.13 Experimental waveforms with proposed control strategy

## 7 结论

(1) 本文根据三相并网逆变器电压电流传感器安装位置的不同分析了 LCL 滤波器网侧阻抗的变化,且对两种电流控制方式下的系统稳定性进行了研究。指出在传统的检测网侧电压的基础上,相比较网侧电流控制方式,对机侧电流的控制有利于系统的稳定,但会导致网侧功率因数的下降。

(2) 建立了基于 LCL 滤波器滤波电容串联和并联无源阻尼电阻两种方式下的系统控制模型,通过系统传函等效原则,选择滤波电容电压前馈方法分别实现有源虚拟阻尼电阻串联和并联的 LCL 滤波器系统控制方案,给出相应的前馈系数。

(3) 通过仿真和实验验证了采用有源虚拟阻尼电阻并联 LCL 滤波的三相并网逆变器的控制方案,仿真和实验结果表明在不增加系统额外的功率损耗的同时保证了逆变器并网电流波形稳定,具有良好的正弦度且谐波含量低。

## 参考文献

- [1] Twining E, Holmes D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 888-895.
- [2] 武健, 何娜, 徐殿国. 三相并联有源滤波器输出滤波器设计方法研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(6): 16-19.  
Wu Jian, He Na, Xu Dianguo. Study on output filter in parallel active power filter[J]. Power Electronics, 2004, 38(6): 16-19.
- [3] 伍小杰, 罗悦华, 乔树通. 三相电压型 PWM 整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 7-12.  
Wu Xiaojie, Luo Yuehua, Qiao Shutong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 7-12.
- [4] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.  
Dong Mi, Luo An. Design and control strategies of inverter for a grid-connected photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(20): 97-102.
- [5] 王正仕, 陈辉明. 具有无功和谐波补偿功能的并网逆变器设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 67-71.  
Wang Zhengshi, Chen Huiming. Design of grid-tied inverters with the functions of reactive and harmonic compensation[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(13): 67-71.
- [6] Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Steffan Han. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1290.
- [7] Wang Timothy CY, Ye Zhihong, Sinha Gautam, et al. Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter[C]. 2003 IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003, 2: 779-784.
- [8] 张宪平, 林资旭, 李亚西, 等. LCL 滤波的 PWM 整流器新型控制策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 74-77.  
Zhang Xianping, Lin Zixu, Li Yaxi, et al. A novel control strategy for PWM rectifier with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 74-77.
- [9] Liserre M, Dell Aquila A, Blaabjerg F. Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 76-86.
- [10] 黄宇淇, 姜新建, 邱阿瑞. LCL 滤波的电压型有源整流器新型主动阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 86-91.  
Huan Yuqi, Jiang Xinjian, Qiu Arui. A novel active damping control scheme for a three-phase active rectifier with LCL-filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 86-91.
- [11] 陈东, 张军明, 钱照明. 带 LCL 滤波器的并网逆变器单电流反馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 27-34.  
Chen Dong, Zhang Junming, Qian Zhaoming. Single current feedback control strategy for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(9): 27-34.
- [12] 潘东华, 阮新波, 王学华, 等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-11.  
Pan Donghua, Ruan Xinbo, Wang Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(18): 1-11.
- [13] 白志红, 阮新波, 徐林. 基于 LCL 滤波的并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(Sup. 1): 118-125.  
Bai Zhihong, Ruan Xinbo, Xu Lin. Control strategies for the grid-connected inverter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(Sup. 1): 118-125.
- [14] 王要强, 吴凤江, 孙力, 等. 带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 34-40.  
Wang Yaoqiang, Wu Fengjiang, Sun Li, et al. Control strategy for grid-connected inverter with an LCL output filter[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(12): 34-40.
- [15] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电



- 容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-143.
- Bao Chenlei, Ruan Xinbo, Wang Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(25): 133-143.
- [16] 李芬, 邹旭东. 并网 LCL 滤波的 PWM 整流器输入阻抗分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 97-103.
- Li Fen, Zou Xudong. Input impedance analysis of LCL-filter PWM rectifier connected to grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 97-103.
- [17] 杜少武, 赵钦, 张胜. 太阳能并网输出 LCL 滤波器的设计[J]. 电力电子技术, 2009, 43(11): 16-18.
- Du Shaowu, Zhao Qin, Zang Sheng. Design of LCL filter for grid-connected photovoltaic inverter[J]. Power Electronics, 2009, 43(11): 16-18.
- [18] 张宪平, 李亚西, 潘磊. 三相电压型整流器的 LCL 型滤波器分析与设计[J]. 电气应用, 2007, 26(5): 65-67.
- Zhang Xianping, Li Yaxi, Pan Lei. Analysis and design of LCL type filter for three-phase voltage source rectifier[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(5): 65-67.
- [19] 陈瑶, 金新民, 童亦斌. 三相电压型 PWM 整流器网侧 LCL 滤波器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 124-129.
- Chen Yao, Jin Xinmin, Tong Yibin. Grid-side LCL-filter of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 124-129.
- [20] 刘飞, 查晓明, 段善旭. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 110-116.
- Liu Fei, Zha Xiaoming, Duan Shanxu. Design and research on parameter of LCL filter in three-phase grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 110-116.

---

#### 作者简介

陈 新 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为功率电子变换技术和新能源发电控制技术。

韦 徵 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为功率电子变换技术。(通讯作者)