

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.6.81

中图分类号: TM464

文献标志码: A

# 弱电网下 LCL 型逆变器的改进并网电流控制策略

朱胤杰, 苗 虹, 曾成碧, 童 广  
(四川大学电气工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 针对弱电网环境下电网阻抗的出现导致 LCL 型并网逆变器系统的相位裕度下降, 造成严重的并网电流畸变, 甚至系统失稳的问题, 提出 1 种改进并网电流控制策略。在电压前馈环中引入多谐振控制器以抑制电网电压背景谐波, 并在电流前馈环中加入相位补偿器以提升系统相位裕度, 从而避免多谐振环节的谐振峰与 $-180^\circ$ 线交汇的风险。理论分析与仿真实验结果均表明, 所提策略可有效抑制弱电网下 LCL 型并网电流谐波, 提高电流质量, 增强并网系统的稳定性。

**关键词:** 弱电网; LCL 型并网逆变器; 多谐振控制器; 并网电流前馈; 相位补偿器

## Improved Grid-connected Current Control Strategy for LCL-type Inverter Connected to Weak Grid

ZHU Yinjie, MIAO Hong, ZENG Chengbi, TONG Guang  
(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** For an LCL-type inverter connected to weak grid, the appearance of grid impedance often results in a decrease in the phase margin, serious distortion of grid-connected current and even system instability. To solve this problem, an improved grid-connected current control strategy is proposed, in which a multi-resonance controller is introduced in the voltage feedforward loop to suppress the voltage background harmonics and a phase compensator is added to the current feedforward loop to improve the system's phase margin, so as to avoid the risk that the resonance peak of the multi-resonance link intersects with the  $-180^\circ$  line. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed strategy can effectively suppress the harmonics of LCL-type grid-connected current, improve the current quality and enhance the stability of the grid-connected system.

**Keywords:** Weak grid; LCL-type grid-connected inverter; multi-resonance controller; grid-connected current feedforward; phase compensator

分布式发电作为利用可再生能源的重要方式, 已成为当今电力领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。并网逆变器

作为连接分布式电源与电网之间的重要装置, 在分布式发电领域发挥着重要作用<sup>[3-4]</sup>。LCL 型滤波器具有所占空间小、抑制谐波能力强等优点, 被广泛应用于并网逆变器<sup>[5]</sup>。但是, 系统的固有谐振会导致并网电流谐波放大, 系统稳定裕度下降, 甚至会引起系统失稳。针对这一问题, 目前通常采用基于阻尼环和并网电流环的双环控制方法。

由于分布式电源规模逐渐增大, 电网的阻抗特性逐渐呈现感性, 同时包含丰富的背景谐波, 呈现出弱电网的特征<sup>[6-7]</sup>。在弱电网环境下, 受电网阻

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2022-02-22, 2022-03-21;

录用日期: 2022-04-06; 网络首发日期: 2022-05-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505502-03); 四川省重点研发资助项目(2021YFG0256, 2021YFG0218)

This work is supported by National Key R&D Program of China under the grant 2018YFC1505502-03; Key R&D Program of Sichuan Province under the grant 2021YFG0256, 2021YFG0218

抗影响,并网电流控制带宽会显著降低,这就对并网逆变器的阻尼控制策略提出了更严格的要求<sup>[8]</sup>。

针对 LCL 型逆变器的阻尼方法可分为无源阻尼和有源阻尼方法<sup>[9-11]</sup>。无源阻尼虽有较好的阻尼效果,但会增加系统损耗;有源阻尼简单高效,通常采用电流反馈来提供系统阻尼,但也存在一定局限性。文献<sup>[12]</sup>将电容电流反馈与滤波电容并联构成虚拟阻抗,结构简单,能够有效抑制 LCL 谐振,但需要较多高精度传感器,系统成本偏高;文献<sup>[13]</sup>提出 1 种基于并网电流反馈的高通滤波器 HPF (high-pass filter)有源阻尼技术,构造出 1 个与电网电感并联的虚拟电阻,相比电容电流反馈方法节省了高精度传感器,但未考虑弱电网环境下谐振频率波动带来的影响;文献<sup>[14-15]</sup>提出采用相位补偿器的策略来解决电网阻抗引起的系统稳定性问题,但仍需要额外的高精度传感器。

综上所述,在考虑弱电网特性情况下,为了抑制 LCL 型逆变器的并网电流谐波,提升系统的稳定性,同时减少额外高精度传感器的使用,本文提出 1 种改进并网电流控制策略。首先建立三相 LCL 并网逆变器系统的数学模型,介绍传统的准比例谐振控制策略。然后在此基础上,在电网电压前馈环引入多谐振控制器抑制电网电压谐波,在并网电流前馈环中加入相位补偿器以弥补引入多谐振控制器导致的系统相位裕度降低的问题。本文所提的改进策略旨在对 LCL 型逆变器并网电流的谐波分量有较好的抑制效果,显著提升系统的稳定性,并使其具有较好的弱电网适应性。

## 1 三相 LCL 型并网逆变器与准比例谐振控制

### 1.1 三相 LCL 型并网逆变器电路拓扑

图 1 为三相 LCL 型并网逆变器的结构,其中 LCL 滤波器由逆变器侧电感  $L_1$ 、滤波电容  $C$  和并网侧电感  $L_2$  构成;  $U_{dc}$  为直流侧电压;  $I_{1i}$  ( $i=a,b,c$ ) 为逆变器输出电流;  $I_{2i}$  ( $i=a,b,c$ ) 为并网电流;  $I_{ci}$  ( $i=a,b,c$ ) 为电容电流;  $U_i$  ( $i=a,b,c$ ) 为逆变器输出电压;  $U_{ci}$  ( $i=a,b,c$ ) 为电容电压;  $U_{gi}$  ( $i=a,b,c$ ) 为并网电

压。电网阻抗通常等效为电网电阻  $R_g$  和电网电感  $L_g$ ,因阻性分量对系统稳定性有利,故本文忽略电网电阻的影响,进而分析最不利的情况。

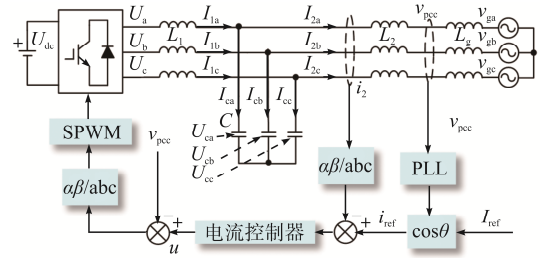


图 1 三相 LCL 并网逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of three-phase LCL-type grid-connected inverter

在三相静止坐标系中,三相 LCL 并网逆变器的数学模型可表示为

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{1i}}{dt} = U_i - U_{ci} \\ (L_2 + L_g) \frac{dI_{2i}}{dt} = U_{ci} - U_{gi} \\ C \frac{dU_{ci}}{dt} = I_{1i} - I_{2i} \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2 准比例谐振控制

以一相为例,图 2 给出了并网电流的准比例谐振控制框图。该控制方法采用公共耦合点电压内环和并网电流外环的双环控制,并利用并网电流反馈构建系统的有源阻尼。图 2 中,  $G_{\text{hpf}}(s)$  为阻尼函数;  $i_{\text{ref}}(s)$  为给定的并网电流参考值;  $K_{\text{PWM}}$  为逆变桥传递函数<sup>[5]</sup>,大小可等效为  $U_{dc}/U_{\text{tri}}$ ,其中  $U_{\text{tri}}$  为三角载波幅值;为抑制电网电压  $v_g(s)$  背景谐波引起的电压扰动,通常在  $v_{\text{pcc}}(s)$  处引入 1 个前馈,记为  $k=1/K_{\text{PWM}}$ ;  $G_d(s)$  为系统延迟,通常由采样开关、离散化计算延时及 PWM 调制延时共同构成,本文取  $e^{-1.5T_s s}$  ( $T_s$  为采样周期)<sup>[15]</sup>。

由图 2 可推得准比例谐振控制系统开环传递函数为

$$G_{i_{\text{ref}}-i_2}(s) = \frac{kK_{\text{PWM}}G_d(s)(s + \omega_h)}{L_1(L_2 + L_g)CA_1 + [L_1 + L_2 + L_g - L_g G_d(s)]A_2 - A_3} \quad (2)$$

式中:  $\omega_h$  为高通滤波器的参数;  $A_1=(s^4+\omega_h s^3)$ ;  $A_2=(s^2+\omega_h s)$ ;  $A_3=k_h k K_{PWS}$ 。

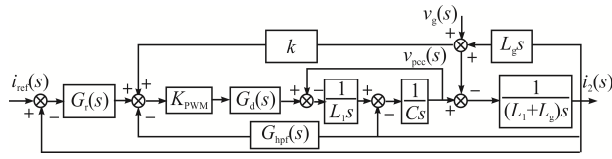


图 2 并网电流前馈的准比例谐振控制框图

Fig. 2 Block diagram of grid-connected current

feedforward under quasi-proportional resonant control

由图 2 和式(2)可得 LCL 的开环谐振频率表达式

$$f_{\text{ref}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (3)$$

其中, 准比例谐振控制器的传递函数为

$$G_r = K_p + \frac{2K_{r1}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中:  $K_p$  为比例系数;  $K_{r1}$  为谐振增益系数;  $\omega_c$  为准比例谐振控制器的截止带宽;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  为控制器的基波角频率,  $f_0$  为基波频率。为了保证当电网频率存在  $\pm 0.5$  Hz 的波动时并网电流在基波频率处的稳态误差  $< 1\%$ , 要求基波增益幅值  $> 75$  dB, 则可取  $\omega_c = 3.14$  rad/s<sup>[8]</sup>。

### 1.3 高通滤波器 HPF 的参数设计

上述模型中, 并网电流前馈有源阻尼方法需要高通滤波器才能实现<sup>[13]</sup>。由于高阶高通滤波器受噪声影响较大, 稳定性较差, 相比一阶高通滤波器并无性能上的提升, 因此本文采用一阶高通滤波器, 其传递函数为

$$G_{\text{hpf}} = -\frac{k_h s}{s + \omega_h} \quad (5)$$

式中,  $k_h$  为高通滤波器的参数, 与  $\omega_h$  的数量关系须满足

$$\begin{cases} k_h = \omega_{\text{ref}}(L_1 + L_2)(2 - k^2)\sqrt{1 - k^2} \\ \omega_h = 2\omega_{\text{ref}}\sqrt{1 - k^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k$  的取值范围为 0.8~0.9, 本文选取  $k=0.85$ ;  $L_1=3$  mH,  $L_2=3$  mH;  $\omega_{\text{ref}}$  为开环谐振角频率, 可表示为

$$\omega_{\text{ref}} = 2\pi f_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (7)$$

由式(7)可算出  $\omega_{\text{ref}}=11\ 547$  rad/s。将上述数据代入式(5)和式(6), 可得本文所用的一阶高通滤波器传递函数表达式为

$$G_{\text{hpf}} = -\frac{31s}{s + 12\ 165.5} \quad (8)$$

## 2 电网电压前馈多谐振控制策略

由于图 2 中的电网电压前馈通道具有全通特性, 因此电网中存在的高次谐波会对系统稳定性造成危害<sup>[4]</sup>。为了抑制电网背景谐波, 本节在图 2 的  $v_{\text{pcc}}$  前馈环中引入多谐振控制器, 使电压前馈通道仅在电网的低频谐波处保持反馈特性, 而在其余高次谐波频段进行有效抑制。引入多谐振控制器  $G_m(s)$  的系统结构如图 3 所示, 其中  $G_k(s)=K_{\text{PWM}}G_d(s)$ 。

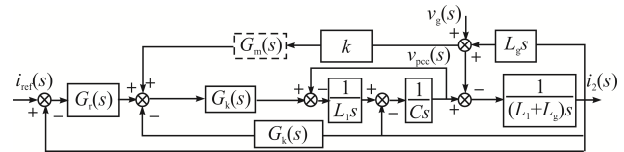


图 3 采用电网电压前馈多谐振控制策略的系统结构

Fig. 3 Block diagram of system structure under multi-resonance control strategy for grid voltage feedforward

### 2.1 多谐振控制器原理

多谐振控制器由多个谐振控制器组成, 其表达式为

$$G_m(s) = \sum_{m=1}^4 \frac{\omega_f s}{s^2 + 2\omega_f s + [(2m+1)\omega_0]^2} \quad (9)$$

式中:  $2m+1$  为谐波频率的次数,  $m$  取整数 1~4;

$\omega_f$  为谐波深度系数, 取值为  $10\pi$ 。

### 2.2 性能分析

由图 3 可得改进后的系统开环传递函数为

$$G_{\text{ref} \rightarrow i_2}(s) = G_k(s)G_r(s)(s + \omega_h) / \{ [L_1(L_2 + L_g)CA_1 + [L_1 + L_2 + L_g - L_g G_d(s)G_m(s)]A_2 - A_3] \} \quad (10)$$

式中:  $A_1=(s^4+\omega_h s^3)$ ;  $A_2=(s^2+\omega_h s)$ ;  $A_3=k_h G_k(s)s$ 。

分析图 3 与式(10)可得系统开环谐振频率表达式为

$$f'_{\text{ref}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + [1 - G_m(s)]L_g}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (11)$$

对比式(4)与式(11), 可见式(11)在分子上增加了系数 $[1 - G_m(s)]L_g$ , 这说明当电网阻抗一定时, 多谐振控制器幅值过大会使谐振频率下降, 进而影响系统稳定性。因此, 需要保证各谐振控制器的系数合适。

采用电网电压前馈多谐振控制策略的系统开环频率特性如图 4 所示。可见: 随着电网电感数值的增加, 系统的相位裕度逐渐减小; 当电网电感为 3 mH 时, 系统的相位裕度几乎为 0, 存在谐振峰与 $-180^\circ$ 线多次交汇的风险, 该处对应频率的谐波会被放大, 进而对系统的稳定性造成极大的危害。

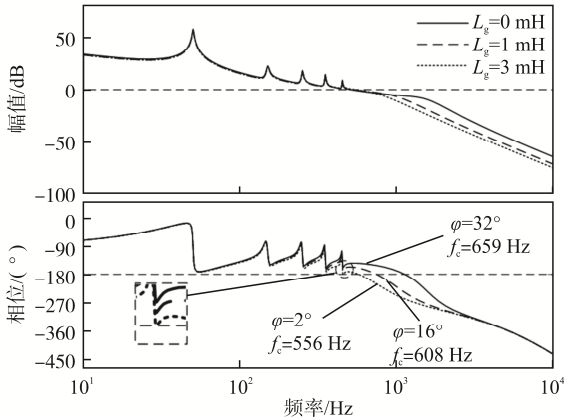


图 4 引入多谐振控制器后的系统开环频率特性

Fig. 4 Open-loop frequency characteristics of system with multi-resonance controller

### 3 改进并网电流控制策略

为了解决图 4 中多谐振控制器带来的系统相位裕度降低的问题, 介绍 1 种改进并网电流前馈相位补偿器策略, 并对系统稳定性进行分析。

#### 3.1 相位补偿器

若采用相位补偿器与多谐振控制器串联的方法可能会影响所在电压回路的增益, 并增加系统的

复杂性。因此, 本文在电压前馈环添加多谐振控制器的基础上, 在电流前馈环中加入相位补偿器  $G_p(s)$ , 以补偿多谐振控制器带来的系统相位裕度降低的问题<sup>[14]</sup>, 其表达式为

$$G_p(s) = \alpha \frac{s+m}{s+n} \quad (12)$$

式中,  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  均为补偿器参数。

加入并网电流前馈相位补偿器控制后的系统结构框图, 如图 5 所示。

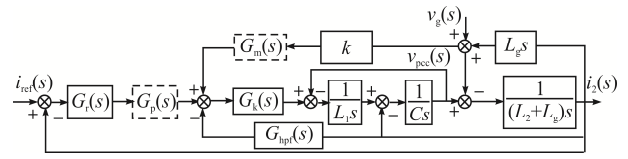


图 5 采用并网电流前馈相位补偿控制策略的系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of system structure under phase compensation control strategy for grid-connected current feedforward

由图 5 可得采用并网电流前馈相位补偿器控制的系统开环传递函数为

$$G'_{\text{ref} \rightarrow i_2}(s) = \frac{G_k(s)G_r(s)G_p(s)}{L_1(L_2 + L_g)CA_1 + [L_1 + L_2 + L_g - L_g G_d(s)G_m(s)]A_2 - A_3} \quad (13)$$

式中:  $A_1=(s^4+\omega_h s^3)$ ;  $A_2=(s^2+\omega_h s)$ ;  $A_3=k_h G_k(s)s$ 。

由于相位补偿器在提高系统相位裕度的同时也会改变环路增益幅值, 因此需对其参数进行合理设计。

#### 3.2 相位补偿器参数设计

为了保证系统添加相位补偿器后开环性能依然良好, 本文根据系统的截止频率、稳定裕度等条件进行补偿器的  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  等参数的设计。

根据式(12)可以得到相位补偿器的一般频率特性, 如图 6。可知, 相位补偿器存在最大补偿点, 将其对应频率记为  $f_i$ ; 为保证系统稳定性良好, 必须设计合适的参数, 使得最大补偿点落在谐波谐振峰区域内, 即避免谐振峰与 $-180^\circ$ 线发生交汇。

为了确保相位补偿的裕度足够大, 即在最大补

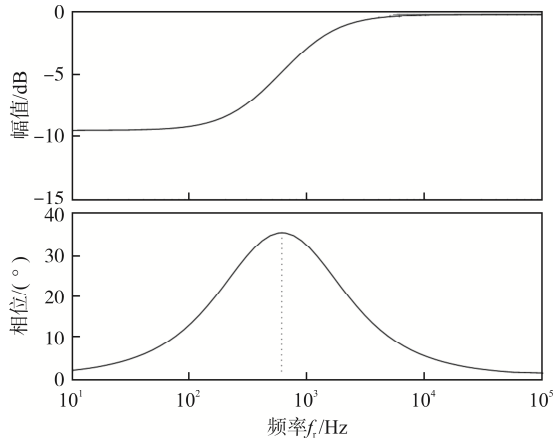


图 6 相位补偿器的一般频率特性

Fig. 6 General frequency characteristic of phase compensator

补偿点处可提供最大相位补偿角  $\theta_c$ , 可抵消系统延迟环节  $G_d(s)$  造成的相位滞后。 $\theta_c$  与  $G_d(s)$  的关系为

$$\theta_c = |\angle G_d(j2\pi f_r)| \quad (14)$$

根据所需最大相位补偿角  $\theta_c$  及相位补偿器的特性可推知相位补偿器参数  $m$ 、 $n$  的数学关系为

$$\begin{cases} nm = 4\pi^2 f_r^2 \\ \frac{m}{n} = \frac{1 - \sin \theta_c}{1 + \sin \theta_c} \end{cases} \quad (15)$$

同时, 为了保证加入相位补偿后谐振峰不触碰  $-180^\circ$  线, 相位补偿器在  $f_r$  处幅值必须为 1, 即满足

$$|G_p(j2\pi f_r)| = 1 \quad (16)$$

联立式(15)与式(16)可以推导得到相位补偿器参数  $\alpha$  的表达式

$$\alpha = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_r^2 + n^2}{4\pi^2 f_r^2 + m^2}} \quad (17)$$

依据式(12)、式(15)及式(17), 结合三相 LCL 并网逆变器模型参数则可求得相应相位补偿器的数学表达式。

### 3.3 弱电网下系统稳定性分析

为了进一步分析所提改进并网电流控制策略对弱电网环境的适应能力, 对不同电网阻抗下系统的稳定性情况进行研究。需要特别说明的是, 一般短路电流比 SCR(short current ratio)  $\leq 10$  即认

为是弱电网<sup>[7]</sup>, 本文考虑的最差情况为电网阻抗  $L_g=3$  mH。系统参数见表 1, 并依据表 1 数据绘制  $L_g=0$ 、1、3 mH 时逆变器开环传递函数的频率特性, 如图 7 所示。

表 1 系统参数

Tab. 1 Parameters of system

参数	数值	参数	数值
直流电压 $U_{dc}/V$	200	电网电压 $u_g/V$	110
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 $\omega_f$	15	9th 谐振系数	70

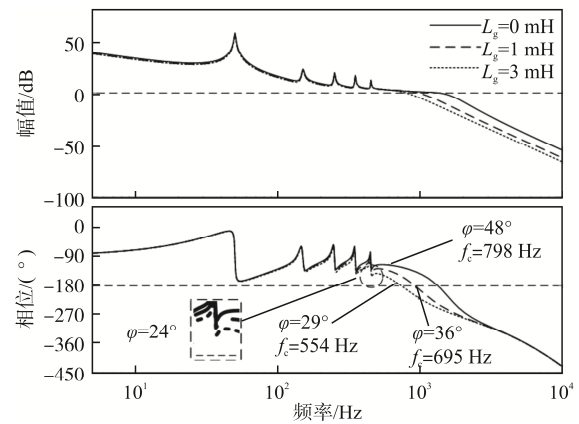


图 7 采用改进并网电流控制策略的系统频率特性

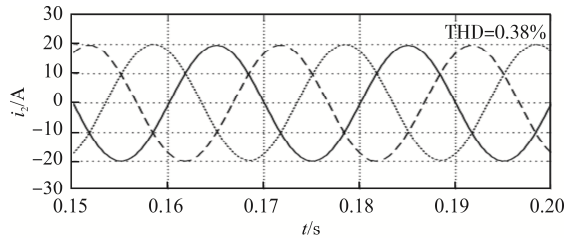
Fig. 7 Frequency characteristics of system under improved grid-connected current control strategy

比较图 7 与图 4 可知: 采用本文所提改进并网电流控制策略后, 当电网电感增大时, 截止频率处的系统相位裕度下降幅度较小; 当  $L_g=3$  mH 时, 并网系统的相位裕度仍有  $24^\circ$ , 各谐振峰亦不存在与  $-180^\circ$  交汇的风险。这说明, 采用本文所提改进控制策略后, 系统在弱电网环境下具有良好的稳定性。

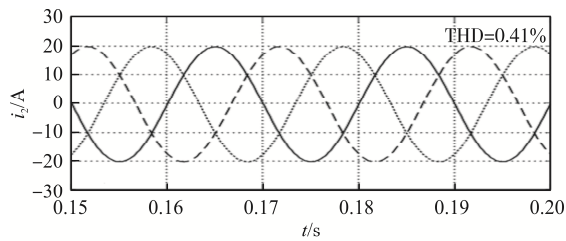
## 4 仿真实验

为了验证本文所提改进并网电流控制策略的有效性, 采用 MATLAB/Simulink 对图 1 中三相 LCL 型并网逆变器系统进行仿真, 仿真参数见表 1。为

了模拟实际电网电压中存在的高次谐波,本文在电网电源处添加 10%的谐波 3 次, 5%的谐波 5 次, 3%的谐波 7 次和 2%的谐波 9 次,并在不同电网阻抗环境下对比电网电压前馈多谐振控制策略与本文所提改进并网电流控制策略对系统并网电流的影响。图 8~图 10 为当电网电感依次取 0、1、3 mH 采用 2 种控制策略时并网电流波形的对比。



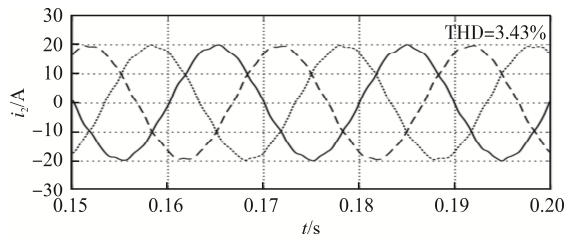
(a)采用电网电压多谐振控制策略



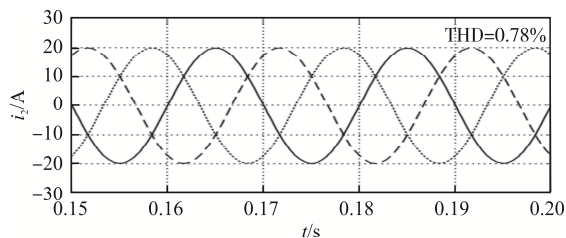
(b)采用改进并网电流控制策略

图 8  $L_g=0$  mH 时 2 种控制策略下的并网电流仿真波形

Fig. 8 Grid-connected current waveforms under two control strategies when  $L_g=0$  mH



(a)采用电网电压多谐振控制策略



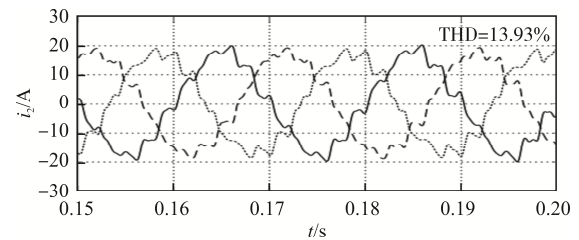
(b)采用改进并网电流控制策略

图 9  $L_g=1$  mH 时 2 种策略下的并网电流仿真波形  
Fig. 9 Grid-connected current waveforms under two strategies when  $L_g=1$  mH

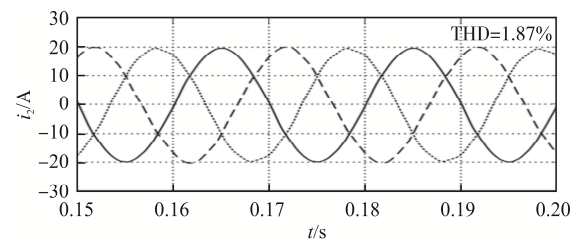
由图 8 可知,在未加电网阻抗时,2 种控制策略下的并网电流波形基本未发生谐波畸变,这是因为多谐振控制器有效抑制了电网电压背景谐波。

由图 9 可知:当  $L_g=1$  mH 时,采用电网电压多谐振控制策略的并网电流出现了一定的谐波畸变,这是因为电网阻抗的出现导致系统的相位裕度降低,多谐振控制器的谐振峰逐渐接近 $-180^\circ$ 线,从而放大了并网电流的谐波分量;采用本文所提改进并网电流控制策略的并网电流波形得到较大改善,谐波畸变现象基本消失。

由图 10 可知:当电网电感增大为 3 mH 时,如前文分析所言,多谐振控制器的谐振峰已经出现越过 $-180^\circ$ 线的情况,采用电网电压前馈多谐振控制策略的电流波形出现严重畸变,总谐波失真 THD (total harmonic distortion)达到 13.93%,会导致系统稳定性变差;与之相比,采用本文所提改进并网电流控制策略的并网电流依旧保持稳定,THD 仅为 1.87%。



(a)采用电网电压多谐振控制策略



(b)采用改进并网电流控制策略

图 10  $L_g=3$  mH 时 2 种策略下的并网电流仿真波形  
Fig. 10 Grid-connected current waveforms under two strategies when  $L_g=3$  mH

图 11 为当  $L_g=3$  mH 采用 2 种策略时并网电流的快速傅里叶变换 FFT (fast Fourier transform) 分析结果。如图 11(a)所示,采用电网电压前馈多谐振控制策略的电流 9 次谐波分量较大,这验

证了在 9 次谐波处出现谐振峰与  $-180^\circ$  线交汇的情况, 导致第 9 次谐波被严重放大。对验图 11(a) 与 (b) 可以看出, 采用本文所提改进并网电流控制策略时, 电流的谐波畸变率明显下降, 且第 9 次谐波下降幅度最为明显。

分析在采用改进并网电流控制策略情况下, 指令电流  $I_{ref}$  发生跳变时系统的动态性能。图 12 为  $I_{ref}$  从 20 A 跳变为 10 A 时并网电流的波形。可以看出, 并网电流能够在 1/2 周期内达到新的稳定状态, 说明采用本文所提策略时并网电流对指令电流的跟踪速度较快, 系统具有优良的动态响应能力。

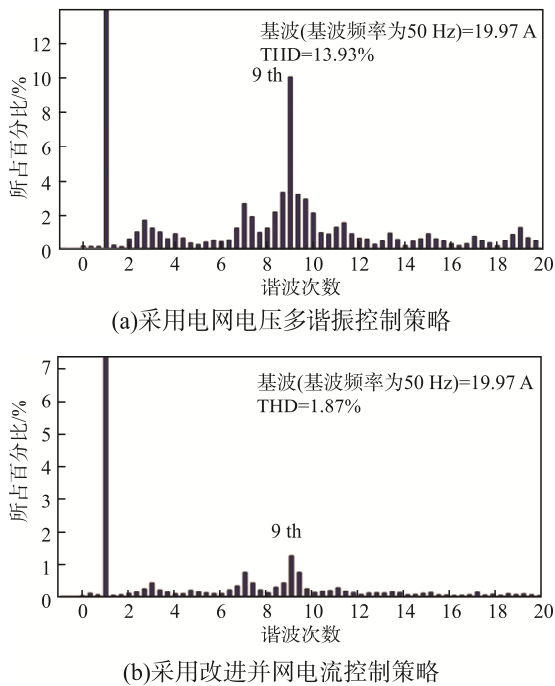


图 11  $L_g=3$  mH 时 2 种策略的谐波分析

Fig. 11 Harmonic analysis under two strategies when  $L_g = 3$  mH

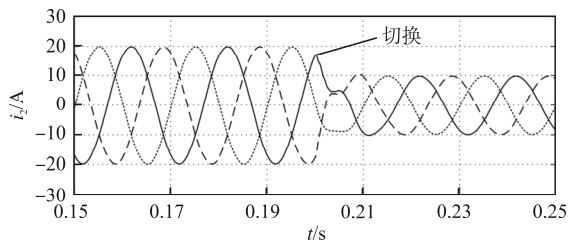


图 12 切换电流幅值的并网电流波形

Fig. 12 Grid-connected current waveforms when switching current amplitude

## 5 实验验证

为验证本文所提改进并网电流控制策略的有效性, 根据图 1 所示三相 LCL 型并网逆变器拓扑结构搭建相应的实验平台。实验所采用的元件和控制参数与仿真(表 1)一致, 主要设备的规格见表 2。三相 LCL 型并网逆变器实验平台, 如图 13 所示。其中, 逆变器由可编程电源供电, 输出侧通过 LCL 滤波电路经可调变压器与公共电网相连。虽然变压器存在一定的漏感, 但相较于电网阻抗而言可忽略不计, 对实验结果影响较小。

表 2 主要设备规格

Tab. 2 Specifications of main components

设备名称	型号规格
逆变器	MWINV-9R144; Myway(9.1 kW)
电流探头	HAS50-S (50 A/4 V)
电压探头	CVC-25 (500 V/5 V)
电解电容	ERWE451LGC152MCB5M
可编程电源	Chroma-61815
二极管模块	PT5221
电磁式继电器	SD-N35(CX) DC24V
数字信号处理器	TMS320C6657
开关式电源	FBA100F-24 (DC24 4.5A)
IGBT-IPM	7MBP50RJ120

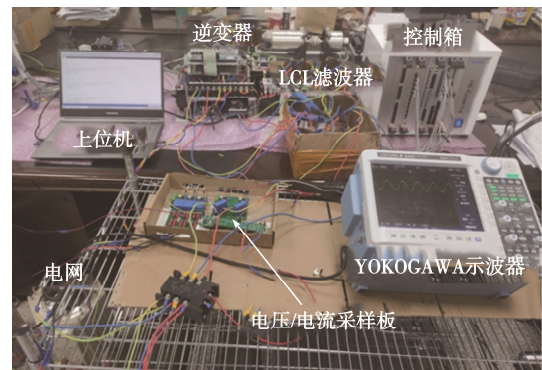


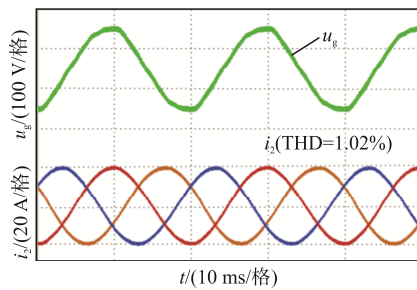
图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

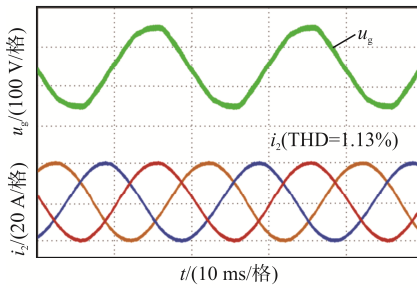
为模拟弱电网环境, 本文通过在电网侧串联一定数值的电感来实现电网阻抗  $L_g$ 。为保证并网的安全, 本文设置了锁相判定程序, 从而确保在锁相操作成功的情况下发出信号导通继电器, 实现安全并网。图 14 和图 15 分别为  $L_g=0、3$  mH 时 2 种控

制策略下的并网电流实验波形。

对比图 14(a)和(b)可知:在无电网阻抗环境下,即当无穷大电网时采用 2 种控制策略的并网电流波形均较平滑,谐波较少,即系统均能保持稳定;当  $L_g$  增大到 3 mH,即弱电网环境时,对比图 15(a)和(b)发现,采用电网电压多谐振控制的畸变情况严重,THD 达到 12.85%,而采用本文所提改进并网电流控制策略后,并网电流波形恢复平稳,谐波畸变明显减少,THD 降至 2.18%。



(a)采用电网电压多谐振控制策略



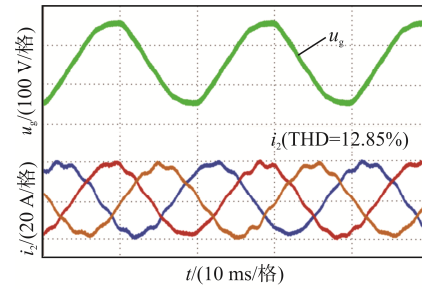
(b)采用改进并网电流控制策略

图 14  $L_g = 0$  mH 时 2 种控制策略下的并网电流实验波形

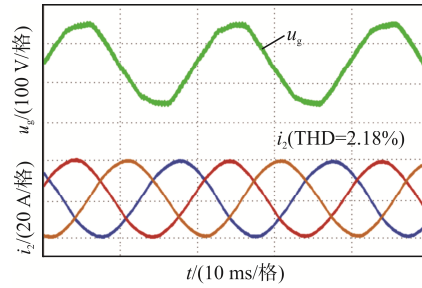
Fig. 14 Experimental waveforms of grid-connected current under two control strategies when  $L_g = 0$  mH

图 16 为采用本文改进并网电流控制策略时系统的动态性能。当指令电流的幅值从 20.0 A 切换为 7.5 A 后,并网电流波形在 1/2 个周期内即可形成新的稳定状态,说明本文所提策略下并网电流对指令电流有较快的跟踪速度,由此可知系统具有较好的动态响应能力。

上述实验结果表明,在弱电网环境下,本文所提改进并网电流控制策略提高了系统的相位裕度,显著增强了系统的稳定性,能有效抑制并网电流谐波,大幅提升了电流质量。



(a)采用电网电压多谐振控制策略



(b)采用改进并网电流控制策略

图 15  $L_g = 3$  mH 时 2 种策略下的并网电流实验波形

Fig. 15 Experimental waveforms of grid-connected current under two strategies when  $L_g = 3$  mH

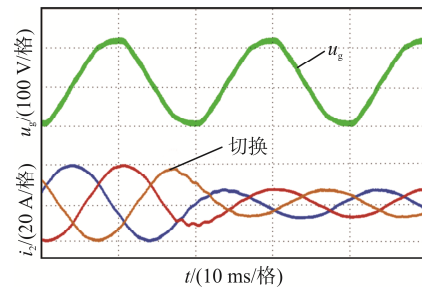


图 16 切换电流幅值的并网电流实验波形

Fig. 16 Experimental waveforms of grid-connected current when switching current amplitude

## 6 结论

由于在弱电网环境下采用传统的准比例谐振控制策略会使系统稳定性下降,因此本文研究 1 种改进并网电流控制策略,采用在电网电压前馈环引入多谐振控制器抑制电网电压背景谐波以达到降低并网电流谐波的目的。另外,在并网电流前馈环加入相位补偿器,以弥补多谐振控制器导致系统相位裕度降低的问题。本文得到结论如下。

(1)本文所采用的并网电流有源阻尼控制方法,

相对其他常用的有源阻尼控制方法(如电容电流前馈等)而言,在保证控制效果的同时,节省了额外的高精度传感器,降低了成本。

(2)通过仿真与实验,验证了本文所提改进并网电流控制策略的有效性,也证明在弱电网下本文所提策略对并网电流谐波分量有较好的抑制效果,有效提升了电流质量,显著增强了并网系统的稳定性。

未来可尝试结合电网阻抗检测技术,自适应调整高通滤波器与相位补偿器的参数,进一步提升并网系统对复杂环境的适应性。

### 参考文献:

- [1] 阮新波, 王学华, 潘冬华, 等. LCL 型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Ruan Xinbo, Wang Xuehua, Pan Donghua, et al. Control Techniques for LCL-type Grid-connected Inverters [M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese).
- [2] Xu Jinming, Tang Ting, Xie Shaojun. Research on low-order current harmonics rejections for grid-connected LCL-filtered inverters [J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5): 1227-1234.
- [3] Hamefors L, Wang Xiongfei, Yepes A G, et al. Passivity-based stability assessment of grid-connected VSCs-An overview [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(1): 116-125.
- [4] 徐飞, 汤雨, 谷伟. 弱电网条件下 LCL 型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.  
Xu Fei, Tang Yu, Gu Wei. Resonant feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4970-4979 (in Chinese).
- [5] Wang Xuehua, Ruan Xinbo, Liu Shangwei, et al. Full feedforward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3119-3127.
- [6] 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.
- [7] 王翰文, 曾成碧, 苗虹. 弱电网下 LCL 逆变器的有源阻尼控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 167-174.  
Wang Hanwen, Zeng Chengbi, Miao Hong. Research on active damping control strategy for LCL inverter in weak grid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 167-174 (in Chinese).
- [8] Zeng Chengbi, Wang Hanwen, Li Sudan, et al. Grid-voltage-feedback active damping with lead compensation for LCL-type inverter connected to weak grid [J]. IEEE Access, 2021, 9: 106813-106823.
- [9] Kang Longyun, Zhang Jianbin, Zhou Hailan, et al. Model predictive current control with fixed switching frequency and dead-time compensation for single-phase PWM rectifier [J]. Electronics, 2021, 10(4): 426.
- [10] An Quntao, Zhang Jianqiu, An Qi, et al. Quasi-proportional-resonant controller based adaptive position observer for sensorless control of PMSM drives under low carrier ratio [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2564-2573.
- [11] 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).
- [12] Dannehl J, Fuchs F W, Thøgersen P B. PI state space current control of grid-connected PWM converters with LCL filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2320-2330.
- [13] 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.
- [14] 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): 1567-1576.

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): 1567-1576 (in Chinese).

- [15] 朱坤龙, 孙鹏菊, 王林, 等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的高鲁棒性加权平均电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3592-3602.

Zhu Kunlong, Sun Pengju, Wang Lin, et al. High robustness weighted average current control for LCL-type grid-connected inverter in a weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3592-3602 (in Chinese).



朱胤杰

作者简介:

朱胤杰(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 新能源并网控制技术。E-mail: zhuyinjie0574@qq.com。

苗虹(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授。研究方向: 分布式发电与微电网。E-mail: 1604681549@qq.com。

曾成碧(1969—), 女, 博士, 教授。研究方向: 新能源发电与并网。E-mail: 857606631@qq.com。

童广(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: LCL 逆变器并网稳定性控制。E-mail: 397174172@qq.com。



来源: 中国文明网