DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.213　　**中图分类号**：TM464　　**文献标志码**：A

基于LCL逆变器并网电流的稳定性研究

常 建[1,2]，王 磊[1,2]，张鹏超[1,2]，保正泽[2]，唐梁彬[1,2]，张 恒[1,2]

(1.陕西理工大学机械工程学院，汉中 723001；2.陕西理工大学陕西省工业自动化重点实验室，汉中 723001)

摘要：在弱电网的逆变器并网系统中，电网阻抗的存在和电压谐波的扰动会造成并网电流畸变，传统电压全前馈的方法虽然可以减小稳态误差但会影响电流质量，甚至威胁到系统的稳定。针对上述问题，提出改进电网电压前馈，即在前馈通道加入谐振前馈抵消电网阻抗的影响，同时保证系统开环增益，增加系统裕度，提高稳定性；再引入比例多谐振控制器代替传统的比例积分控制器，用来抑制电网谐波对并网电流的影响，进而降低并网电流谐波含量，提高并网电流质量。最后通过仿真验证该控制策略的有效性。

关键词：弱电网；LCL逆变器；有源阻尼；电压前馈；多谐振控制

Stability Study of Grid-connected Current Based on LCL Inverter

CHANG Jian[1,2], WANG Lei[1,2], ZHANG Pengchao[1,2], BAO Zhengze[2], TANG Liangbin[1,2], ZHANG Heng[1,2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: In the inverter grid-connected system with weak grid, the existence of grid impedance and voltage harmonic perturbation will cause the distortion of grid-connected current, and the traditional voltage full feedforward method reduces the steady-state error but affects the quality of current, and even threatens the instability of the system. To address the above problems, it is proposed to improve the grid voltage feedforward, i.e., to add resonant feedforward in the feedforward channel to offset the influence of grid impedance, and at the same time ensure the system open-loop gain, increase the system margin, and improve the stability; and secondly to introduce a proportional multi-resonance controller instead of the traditional proportional integral controller, which is used to suppress the influence of grid harmonics on the grid-connected currents, and then to lower the harmonic content of the grid-connected currents and improve the quality of grid-connected currents. Finally, the effectiveness of the control strategy is verified by simulation.

Keywords: Weak grid; LCL inverter; active damping; voltage feedforward; multi-resonance controller

随着可再生能源的快速发展和普及，光伏逆变器作为将太阳能转换为电能的关键设备，在弱电网环境下的应用日益重要，也成为研究的热点问题，其中并网电流的质量是并网发电的关键[1-3]。一方面，并网逆变器的滤波器容易引起谐振，但对于消除滤波器的谐振尖峰目前已有较多研究[4-8]；另一方面，除逆变器本身调制产生高频谐振，弱电网电网阻抗的存在使得系统的开环增益及带宽都有所下降，背景低次谐波影响电流波形，因此电网阻抗与电网谐波影响系统稳定[9-11]。文献[12]提出并网电流反馈的有源阻尼策略，即在控制端构造电网电感并联虚拟电阻，相比电容电流反馈策略，传感器

收稿日期：2024-09-23；**修回日期**：2024-10-10，2024-10-20；
录用日期：2024-11-07；**网络首发日期**：2024-11-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62176146)
This work is supported by National Science Foundation of China under the grant 62176146

成本大大降低，但没有考虑到弱电网下谐振频率波动的影响；文献[13]在前馈方法基础上采用并网电流的二阶微分相微分项前馈，对滤波器的固有谐振频率进行抑制，虽然系统的稳定性及抗干扰性能较好，但噪声对其影响较大；文献[14]提出的加权系数方法同时兼顾系统的稳定性和谐波抑制能力，但设计过程相对烦琐；文献[15]采用自适应改进前馈策略，根据电网阻抗的变化对前馈策略实时调整，虽然提升了并网系统的鲁棒性，但需要提取的状态量较多，对传感器数量及精度要求高，成本更高。

根据上述关于 LCL 并网逆变器不同控制的研究，本文首先引入电容电流反馈的有源阻尼控制以减小谐振；然后提出在前馈通道加入谐振的方法抑制电网阻抗的影响，以提高系统的稳定裕度，同时引入比例多谐振控制器控制电流外环，以抵消低次谐波；最后将改进电网电压谐振前馈与多谐振控制器结合，并通过 MATLAB/Simulink 进行仿真验证，证明所提策略具有较好的稳定性和优良的动态性能。

1 LCL 并网逆变器数学模型

图 1 为单相电压型并网逆变器主电路及其控制示意图，主电路中的 4 个开关管组成逆变全桥电路，控制部分主要由锁相环 PLL(phase-locked loop)模块采样及电流环控制。图中：U_{dc} 为直流侧输入电压；L_1 为逆变器侧电感；C 为滤波电容；L_2 为电网侧电感；L_1、C、L_2 共同组成 LCL 滤波器；U_g 为电网电压；X_L 为电网阻抗；θ 为 PLL 提取的电网电压基波相位；I^*为电网电流基准值；I_{ref}为参考电流，由 θ 与 I^*合成；i_1、i_C、i_2 分别为逆变器侧电感电流、电容电流、网侧电感电流；G_C 为控制器；U_{pcc} 为公共耦合点电压。由于单极性倍频调制具有开关损耗低、谐波含量少等优点，故逆变器调制方式采用单极性倍频调制。其中 PLL 由二阶广义积分器输出相位相差 90° 的 $\alpha\beta$ 坐标下的量，后经坐标变换将 $\alpha\beta$ 坐标下的量转换为 dq 旋转坐标下的量，最后通过比例积分 PI(proportional integral)控制器和积分控制之后输出相位信息。

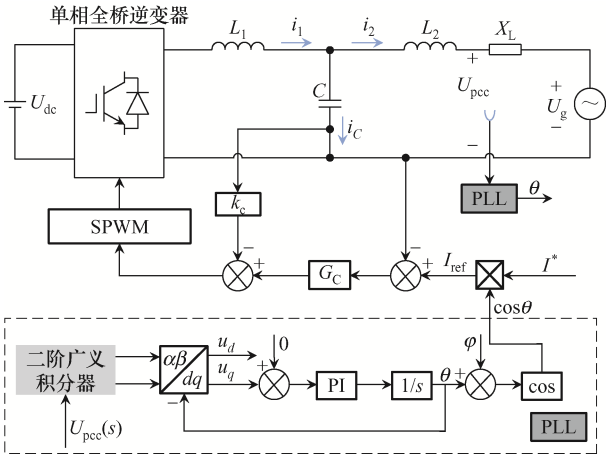


图 1 LCL 并网逆变器结构示意

Fig. 1 Schematic of LCL grid-connected inverter

图 2 为在不考虑有源阻尼及电网阻抗下的基本控制框图，其中延时等效问题参考文献[13]，基于等面积法的补偿器来抵消系统延时带来的影响，在系统完全补偿后的延时便可作为增益为 1 的比例环节。由于该模型开关频率远超过开环截止频率，则全桥逆变电路调制波到逆变器侧的等效传递函数 K_{pwm} 可近似表示为

$$K_{pwm}=\frac{U_{dc}}{U_{tri}} \tag{1}$$

式中：U_{dc} 为直流侧电压幅值；U_{tri} 为单极倍频三角载波幅值。将逆变器 K_{pwm} 与电流控制器进行归一处理，表示为控制器 G_C。

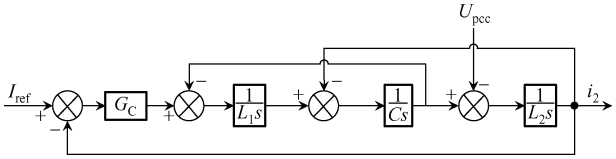


图 2 结构控制框图

Fig. 2 Structural control block diagram

由图 2 可推导出入网电流 i_2 与参考电流 I_{ref}之间的传递函数 $G_{r,2}$ 的表达式为

$$G_{r,2}(s)=\frac{i_2(s)}{I_{ref}(s)}=\frac{G_C}{L_1L_2Cs^3+L_1s+L_2s}=\frac{G_C\omega_r^2}{(L_1+L_2)s(s^2+\omega_r^2)} \tag{2}$$

式中，ω_r 为 LCL 谐振角。谐振角频率f_r取值为电网

基频的 10 倍，小于 0.5 倍的采样频率，其表达式为

$$f_{\mathrm{r}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} \tag{3}$$

根据图 2，在电网电压扰动情况下，输出电流 i_2 与公共耦合点电压 U_{pcc} 的传递函数 $G_{\mathrm{r,v}}(s)$ 为

$$G_{\mathrm{r,v}}(s)=\frac{i_2(s)}{-U_{\mathrm{pcc}}(s)}=\frac{G_1}{1+G_{\mathrm{r,2}}} \tag{4}$$

$$G_1(s)=\frac{s^2L_1C+1}{s^3L_1L_2C+s(L_1+L_2)} \tag{5}$$

由系统等效控制框图与式(2)和式(3)可得并网电流 i_2 的表达式为

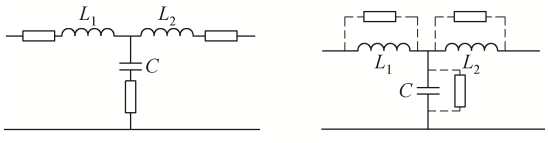
$$i_2(s)=G_{\mathrm{r,2}}(s)I_{\mathrm{ref}}(s)-G_{\mathrm{r,v}}(s)U_{\mathrm{pcc}}(s) \tag{6}$$

在式(2)中没有二次阻尼项，无法抑制滤波器带来的谐振影响；在式(6)中并网电流受到耦合点电压影响，耦合点电压受到电网阻抗及谐波的影响，因此需抑制系统固有谐振并削弱电网阻抗与谐波的扰动。

2　固有谐振抑制方法

2.1　引入电容电流反馈的有源阻尼

在 LCL 型逆变器中，滤波器产生固有谐振对系统影响较大，目前解决的方法一般分为 2 类：无源阻尼法和有源阻尼法。无源阻尼法是通过在滤波器的电感或电容上串并联电阻来达到阻尼的效果，但此方法往往会伴随较大损耗，且系统效率低，一般不单独使用。有源阻尼法是通过在控制中加入虚拟电阻的方法模拟 6 种无源阻尼(如图 3 所示)的效果。在 6 种引入阻尼的方式中电容并联电阻效果最好，故本文引入电容并联虚拟阻抗的有源阻尼控制来抑制谐振尖峰，同时保证滤波器在低频段和高频段的增益，确保响应快、稳定性高。



(a) 串联电阻　　(b) 并联电阻

图 3　6 种无源阻尼法

Fig. 3 Six passive damping methods

图 4 为采用电容并联电阻的方式等效变换控制框图，通过控制部分来实现阻尼效果。首先将引入点前移至控制部分，即将采样到的信息进行有源阻尼控制，但由于此时阻尼系数 k_{d} 有二阶微分项存在，且微分会放大噪声，离散微分会有误差，削弱有源阻尼效果，所以要将引出点前移来抵消二次微分项带来的噪声干扰，等效变换后采用电容电流反馈控制增加系统阻尼。

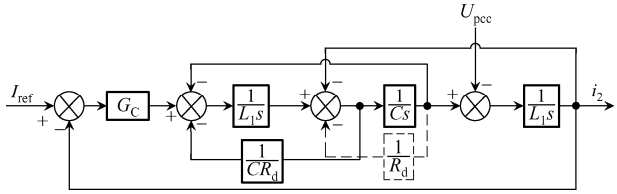


图 4　电容电流反馈控制框图

Fig. 4 Capacitor current feedback control block diagram

2.2　抑制谐振效果分析

根据图 4 可得系统的开环传递函数 G_{lclz}，并绘制带有电容电流反馈阻尼的系统伯德图，如图 5 所示。G_{lclz} 的表达式为

$$G_{\mathrm{lclz}}=\frac{G_{\mathrm{C}}}{s^3L_1L_2C+s^2k_{\mathrm{d}}L_2C+(L_1+L_2)s} \tag{7}$$

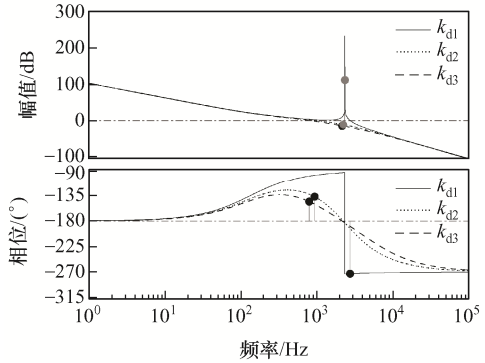


图 5　开环系统伯德图

Fig. 5 Open-loop system Bode diagram

通过伯德图设计合适的阻尼系数，当滤波器侧无阻尼即 k_{d1}=0 时，系统在 1 500 Hz 处产生较大谐振，增益裕度为负，系统闭环不稳定；引入阻尼系数 k_{d2}=20 时，谐振点处幅值被抑制，截止频率向左移动，相位裕度为正，低频和高频的幅值不变；当阻尼系数 k_{d3}=30 时，截止频率继续向左移动，抑制谐波，但其相位裕度降低，低频和高频幅值不变。基于伯德图方法对参数整定，综

合考虑采用阻尼系数 k_{d2}。

3 改进谐振前馈与多控制器结合的控制策略

3.1 传统电压全前馈

在实际弱电网下，由于输电线路较长等因素，电网阻抗不可忽略，且会影响并网电流的质量，考虑到电网阻抗呈阻感性，电阻特性对系统的稳定性有利，所以只考虑纯电感 L_g 的电网阻抗。由式(6)可知耦合点电压对系统的并网电流影响较大，为了消除携带电网扰动的耦合点电压对逆变器并网电流的影响，传统方法通过增加一条电网电压全前馈回路来补偿电网电压扰动，如图 6 所示，将控制框图中电网阻抗电压前移至调节器，推出等效前馈控制下系统的开环传递函数为

$$G_q=\frac{G_C}{s^3L_1(L_2+L_g)C+s^2k_dC(L_2+L_g)+s(L_1+L_2)} \tag{8}$$

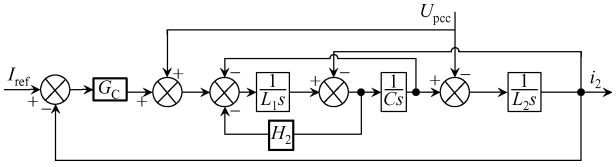
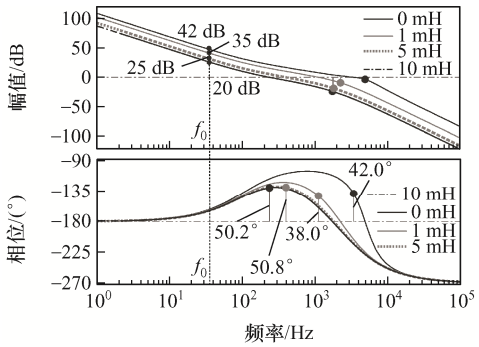


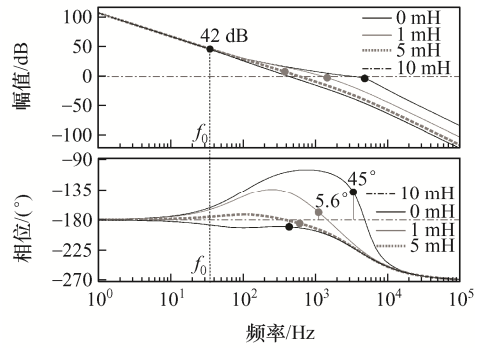
图 6 传统电压全前馈的控制框图

Fig. 6 Control block diagram of conventional voltage full feedforward

根据无电压前馈与电压全前馈绘制对应的系统伯德图，图 7(a)为并网逆变器耦合点无前馈的幅频特性曲线，图 7(b)为并网逆变器耦合点全前馈的幅频特性曲线。图 7(a)中，随着电网阻抗 L_g 由 0 mH 增加到 1、5、10 mH，对应相角裕度都较大且系统稳定，但在系统基频处的增益由最初的 42 dB 一直下降到最终的 20 dB，对系统增益影响较大。图 7(b)中，显然在无电网阻抗时系统稳定裕度为 45°，系统稳定，但当电网阻抗 L_g=1 mH 时，相角裕度降至 5.6°，电网阻抗 L_g 为 5 mH 和 10 mH 时，无相角裕度且系统不稳定，可见传统全前馈在电网感抗较大时会使 LCL 滤波器的谐振角频率快速下降，致使谐振共轭极点左移，导致系统的稳定裕度大幅降低，对系统稳定性造成严重影响，但其增益不随阻抗下降。



(a) 耦合点无前馈系统伯德图



(b) 耦合点全前馈系统伯德图

图 7 耦合点无前馈与全前馈对比

Fig. 7 Coupling point without feedforward vs full feedforward plot

3.2 改进谐振前馈策略

传统全前馈虽然在电网阻抗增加时不会影响系统增益，但在电网感抗较大时会使 LCL 滤波器的谐振角频率快速下降，电网感抗的影响使得系统的稳定裕度快速降低。因此，本文在文献[13]的基础上，提出在电压前馈通道加入谐振环节，其本质为二阶广义积分器进行基波提取的谐振环，使其在低次谐波处保持原有特性，高次谐波具有衰减特性。引入的二阶谐振环节 G_v 的表达式为

$$G_v=\frac{k_r\omega_{c1}s}{s^2+2k_r\omega_{c1}s+\omega_{c1}^2} \tag{9}$$

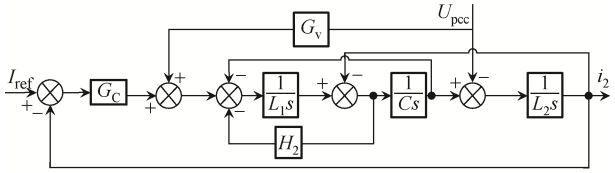
式中：ω_{c1} 为提取频次角速度；k_r 为谐振系数。

谐振前馈控制框图如图 8(a)所示，在原有的耦合点全前馈通道的基础上加入谐振环节，然后通过控制框图的等效变换(如图 8(b)所示)，将改进的耦

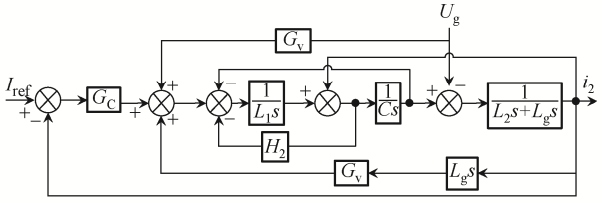
合点电压前馈拆开为电网电压与电网阻抗，并分别通过谐振环节前馈到控制器，最后可推导出改进后谐振前馈的开环传递函数 $G_{\mathrm{g,open}}$ 的表达式为

$$G_{\mathrm{g,open}} = G_{\mathrm{C}} / [s^3 L_1 (L_2 + L_{\mathrm{g}}) C + s^2 k_{\mathrm{d}} C (L_2 + L_{\mathrm{g}}) + s(L_1 + L_2 + L_{\mathrm{g}}) - s L_{\mathrm{g}} G_{\mathrm{v}}] \tag{10}$$

此时考虑引入的谐振前馈电网阻抗表达式。



(a) 谐振前馈控制框图



(b) 谐振前馈等效控制框图

图 8　谐振前馈的控制框图

Fig. 8 Resonant feedforward control block diagram

谐振前馈系统的开环伯德图如图 9 所示。基波 f_0 处的增益并不随着阻抗的增加而减小，电网阻抗对其增益无影响，在无电网阻抗时系统稳定裕度为 42°，系统稳定；随着电网阻抗增加，相角裕度无明显下降；当电网阻抗增加到 L_{g}=5 mH 时，相角裕度为 45°；当电网阻抗增加到 L_{g}=10 mH 时，仍有 39° 的相角裕度。可见在电网阻抗变化时，谐振前馈保留了无前馈时相角裕度大、全前馈基频增益不变的优点。

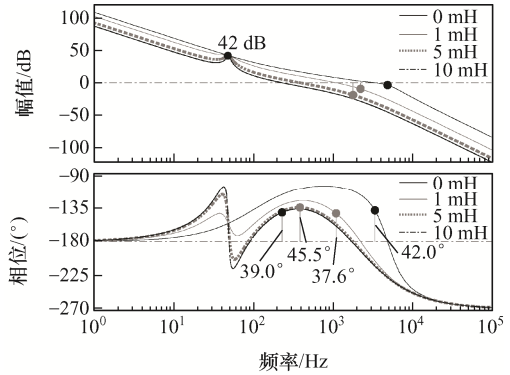


图 9　谐振前馈系统伯德图

Fig. 9 Resonant feedforward system Bode diagram

3.3 准比例多谐振控制器与改进谐振前馈结合

弱电网通常会面临较多的电压谐波和电网噪声，可能会影响到逆变器的稳定性和抗干扰能力。PI 控制器可能无法有效地抑制这些干扰，导致输出电流的波动增加或者系统整体性能下降。而理想的比例谐振 PR(proportional resonant)控制器对于电网参数过于敏感，在实际中 PR 较难实现。因此，常用准比例谐振 QPR(quasi-PR)，其中截止频率 ω_{c} 主要影响谐振频率 ω_0 处带宽，通过控制 ω_{c} 来控制谐振点带宽，调节系数 K_{P} 和 K_{r} 可以优化系统动态性能。在电力系统中，当电源电压出现波动或负载发生突变时，整流器所输出的电流往往包含 3、5、7 等次谐波成分，这些谐波成分会降低电流的质量。为了改善这种情况，在 QPR 基础上引入多谐振控制器。这种控制器能够检测并补偿相应次谐波，通过反馈机制实现谐波的补偿，有效减少电流中的谐波含量，并提高电流质量。从多谐振控制器传递函数可知，在频率为基波、3 倍谐波、5 倍谐波、7 倍谐波处增益较大，说明在特定频率处的信号实现了无静差跟踪。因此，G_{C} 控制器采用比例多谐振控制，其传递函数表达式为

$$G_{\mathrm{C}} = K_{\mathrm{po}} + \sum_{n=0}^{3} \frac{2K_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{c}} s}{s^2 + 2\omega_{\mathrm{c}} s + [(2n+1)\omega_0]^2} \tag{11}$$

式中：K_{po} 为比例系数；n 为谐波相对于基波频率的倍数(含有 3、5、7 次谐波)。

改进的谐振前馈可以抑制电网阻抗产生的谐振问题，减小入网电流的稳态误差，减小弱电网感抗对并网电流稳定性的影响，但是对于抑制电网低频谐波的能力不足，造成系统低次谐波含量较多；而所引入的多谐振控制器对电网电压的低次谐波的抑制能力较强。本文同时使用改进的谐振前馈与多谐振控制器，在弱电网下提升入网电流的稳定性及降低低次谐波对系统的影响。将比例多谐振控制器 G_{C} 代入式(10)，可得到系统的开环传递函数，图 10 对应其传递函数伯德图。由于电网阻抗 L_{g}= 1 mH 在传统前馈下仍可稳定，所以只考虑系统电网感抗 L_{g} 分别为 0、5、10 mH 时的幅频响应和相频响应，可以看出无电网阻抗时有较大的相位裕

度，系统稳定；当 L_g=5 mH 时，相位裕度依然较大且闭环稳定；当 L_g=10 mH 时，开环截止频率向左移动，相位裕度较大，但依然保持稳定状态。谐振前馈与多谐振控制器结合的控制策略不影响系统稳定性，且基频幅值增益稳定不随电网阻抗的变化而变化，虽相较于单独谐波前馈的相位裕度略微下降，但电流谐波控制器提高了对电网低次谐波抑制，兼顾入网电流的稳态误差，提高了对谐波的抑制能力。

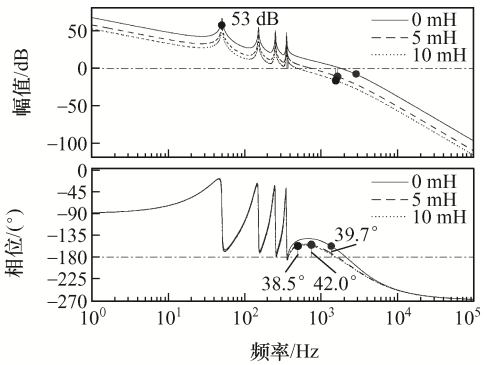


图 10 系统控制策略伯德图

Fig. 10 System control strategy Bode diagram

4 仿真及结果分析

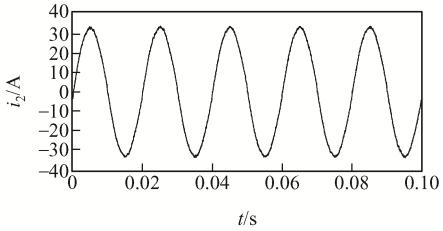
为验证本文提出的控制策略对并网电流质量的提升效果，在 MATLAB/Simulink 中搭建单相 LCL 并网逆变器仿真模型，模型参数见表 1。

表 1 系统主要参数

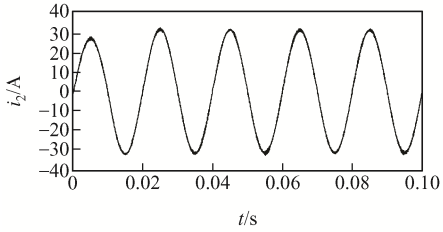
Tab. 1 Main system parameters

参数	数值
额定功率/kW	5
直流电压/V	400
开关频率/kHz	10
交流侧额定电流有效值/A	22.73
交流侧额定电流最大值/A	32
传统 PI 电流外环比例系数	12
传统 PI 电流外环积分系数	10 000
电感 L_1/mH	0.80
电感 L_2/mH	0.12
电容 C/μF	10
多谐振比例系数	20
电流外环谐振系数	1 000
谐振前馈系数	0.5

为了模拟真实电网存在的高次谐波，在电网中分别串联 3、5、7 次谐波，其含量分别为电网基波幅值的 10%、6%、3%。在电网存在奇次谐波的背景下对不同工况的电流进行验证，结果如图 11~图 13 所示。如图 11 所示，在电网阻抗 L_g=0 mH 时 2 种控制策略都能产生较好的电流波形；图 12 为在 L_g=5 mH 时传统全前馈控制与改进前馈控制的



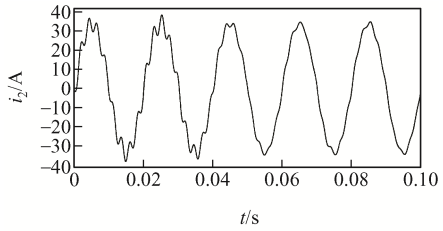
(a) 传统全前馈控制策略



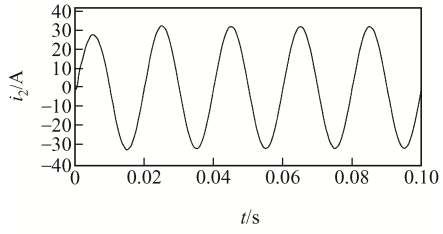
(b) 改进前馈控制策略

图 11 L_g=0 mH 时 2 种不同控制并网电流波形对比

Fig. 11 Comparison of two different controlled grid-connected current waveforms for L_g=0 mH



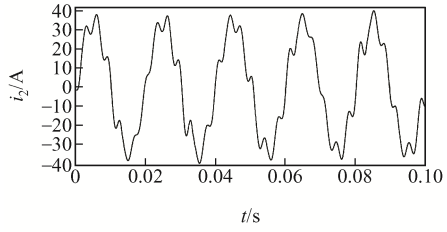
(a) 传统全前馈控制策略



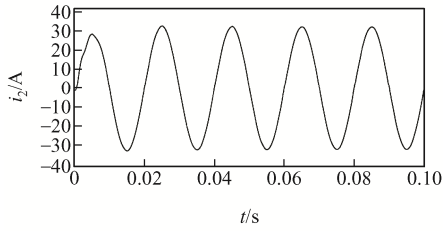
(b) 改进前馈控制策略

图 12 L_g=5 mH 时 2 种不同控制并网电流波形对比

Fig. 12 Comparison of two different controlled grid-connected current waveforms for L_g=5 mH



(a) 传统全前馈控制策略



(b) 改进前馈控制策略

图 13　L_g=10 mH 时 2 种不同控制并网电流波形对比

Fig. 13 Comparison of two different controlled grid-connected current waveforms for L_g=10 mH

对比，传统全前馈在前 2 个周期谐波较大，到 0.04 s 后波形较为良好，但也存在谐波，波形畸变；图 13 为在 L_g=10 mH 时 2 种控制的对比，可以看出传统前馈并网电流畸变严重，存在较大谐波，电流幅值与参考值之间存在较大误差。

不同电网阻抗下不同控制策略的并网电流谐波含量见表 2，其中自适应谐振前馈控制引用文献[15]中控制对并网电流谐波含量影响的数据。

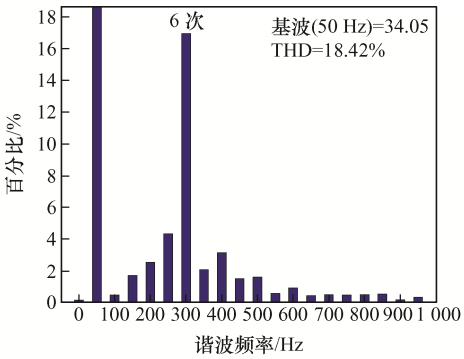
表 2　不同电网阻抗下不同控制策略的并网电流谐波含量

Tab. 2 Harmonic content of grid-connected current with different control strategies under different grid impedances

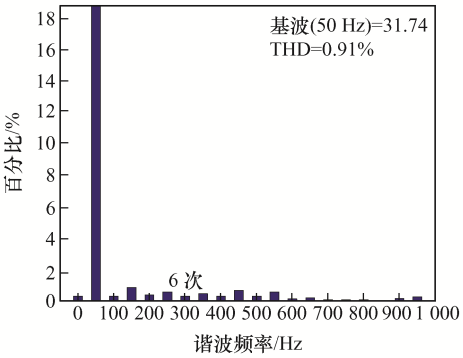
%

控制策略	L_g=0 mH	L_g=5 mH	L_g=10 mH
传统全前馈控制	2.45	3.75	18.42
自适应谐振前馈控制	2.40	2.10	1.70
改进复合控制	1.80	1.35	0.91

观察图 11 可知，由于改进控制策略在前馈中加入谐振环节，对基波之外频率处的电网阻抗起到衰减作用，且不影响基波前馈抵消扰动的效果，因此改进前后并网电流波形都较好。本文对上述波形进行傅里叶分解，并对比了传统前馈控制谐波含量、文献[15]中的自适应前馈控制所得电流谐波含量以及本文改进前馈控制的谐波含量(如表 2)，在实际并网中要求并网电流的总谐波率必须控制在 5.00%以下，当电网阻抗 10 mH 时传统控制策略显然不满足要求，总谐波率达到 18.42%，通过改进的前馈控制谐波率达到并网条件，且质量较高。图 14 为对电网阻抗为 10 mH 的并网电流的傅里叶分解结果。图 14(a)所示传统全前馈控制电流幅值与参考幅值误差为 2.00 A，在 6 次谐波处谐波含量约达 17.0%；图14(b)所示改进的前馈控制策略电流幅值误差为 0.26 A，在 6 次谐波处含量降至 0.1%，除 6 次谐波外其余各次谐波均降至 0.8%以下，因此验证了改进前馈与准比例多谐振控制器结合的控制策略减小了谐波含量，提高了并网电流质量，有较好的抗干扰性。



(a) 传统全前馈控制策略



(b) 改进前馈控制策略

图 14　L_g=10 mH 时 2 种控制策略的谐波分析

Fig. 14 Harmonic analysis plot of two control strategies for L_g=10 mH

图 15 为采用改进后的前馈策略且并网电流参考值 I_{ref} 发生跳变时并网电流的动态响应。图中在切换点处并网电流参考值由 32 A 跳变至 20 A，可

以观察到在跳变点处波形振荡并出现尖峰，但波形畸变程度较小且在 1 个周期内电流恢复到新的稳定状态，因此改进的前馈控制策略对参考电流跟踪速度快，具有优良的动态性能。图 16 为在第 2 周期加入 L_g=5 mH 和 L_g=10 mH 的电网阻抗扰动的并网电流波形示意，可见在 0.04~0.08 s 时间段分别加入不同电网阻抗扰动，在 0.08 s 去除扰动，电流产生极短时间振荡，但对系统影响较小且电流极快恢复稳定，因此具有优良的抗干扰性能。

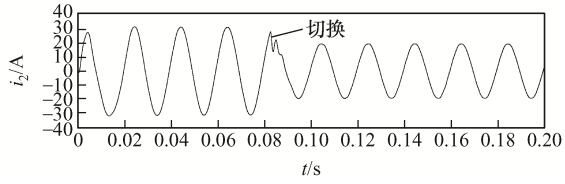


图 15 切换电流幅值的并网电流波形

Fig. 15 Grid-connected current waveform with switching current amplitude

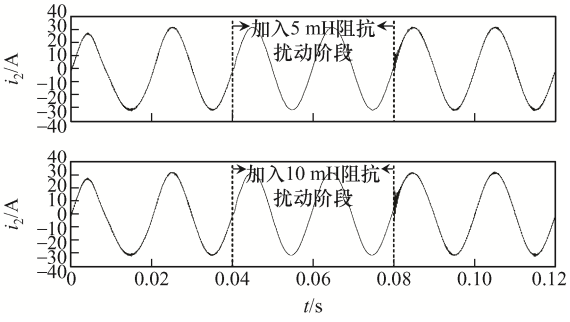


图 16 注入电网扰动前后的并网电流波形

Fig. 16 Waveforms of grid-connected current before and after injection of grid disturbance

5 结语

本文针对 LCL 滤波器固有谐振、电网阻抗和电网谐波影响并网电流质量这一问题，采用有源阻尼抑制固有谐振的影响，并提出改进电网电压前馈与多谐振控制器结合的控制策略，来减小并网阻抗引起的谐振问题，消除并网点电压对并网电流谐波的影响。通过搭建 Simulink 模型进行仿真分析，结果显示在该策略下并网电流谐波含量明显低于传统控制的并网谐波含量，提高了并网电流质量，且具有良好的抗干扰性与稳定性能。但受研究条件及水平限制，本文仅在仿真层次进行了相关研究，下一步还需搭建实物实验平台进行进一步验证。

参考文献：

[1] Li Yan, Chi Yongning, Tian Xinshou, et al. Research on capacity planning of renewable energy grid integration based on effective short circuit ratio [C]// 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chengdu, China, 2021: 622-627.

[2] 杨硕, 徐哲恒, 陶顺, 等. 含并网变流器配电网宽频谐波谐振评估研究[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 96-105.
Yang Shuo, Xu Zheheng, Tao Shun, et al. Research on wideband harmonic resonance assessment of distribution network with grid-connected converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 96-105. (in Chinese)

[3] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
Ma Xiping, Jia Rong, Liang Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 杨明, 宋明洋, 张国澎, 等. LCL 型并网逆变器新型电容电压有源阻尼策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 399-408.
Yang Ming, Song Mingyang, Zhang Guopeng, et al. New type capacittive voltage active damping strategy for LCL grid-connected inverter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 399-408. (in Chinese)

[6] 刘江, 高淑萍, 孙向东, 等. 弱电网下光伏并网逆变器谐振抑制方法综述[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 65-71.
Liu Jiang, Gao Shuping, Sun Xiangdong, et al. Overview of resonance suppression methods for PV grid-connected inverters in weak grid [J]. Southern Power System Techno-

logy, 2024, 18(3): 65-71. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 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 Binfeng. 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. (in Chinese)

[9] 王一, 刘树, 刘建政, 等. 逆变器并网系统谐振机理与阻尼控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 3008-3020.
Wang Yi, Liu Shu, Liu Jianzheng, et al. The stability criterion and damping control strategy for grid-connected inverters and its impact on the global system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 3008-3020. (in Chinese)

[10] Li Ming, Zhang Xing, Guo Zixuan, et al. The control strategy for the grid-connected inverter through impedance reshaping in *q*-axis and its stability analysis under a weak grid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3229-3242.

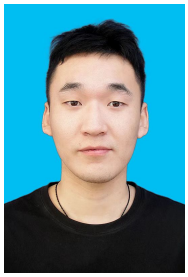
[11] Wen Bo, Dong Dong, Boroyevich D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26-38.

[12] 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.

[13] 黄玉和, 郑寿森, 何来沛. 基于虚拟阻抗的并网逆变器前馈控制策略研究[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 61(2): 90-99.
Huang Yuhe, Zheng Shousen, He Laipei. Study on feedforward control strategy of grid-connected inverter based on virtual resistance [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2022, 61(2): 90-99. (in Chinese)

[14] 刘昊, 方天治, 张惠丽, 等. 弱电网下应对复杂稳定性问题的并网逆变器改进电压前馈通路研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4955-4967.
Liu Hao, Fang Tianzhi, Zhang Huili, et al. Research on an improved voltage feedforward path of grid-connected inverter coping with complex stability issues in weak grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 4955-4967. (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): 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)



常建

作者简介：

常建(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：并网逆变控制技术。E-mail：1591124781@qq.com。

王磊(1972—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：智能计算，机器学习，大数据分析。E-mail：leiwang@xaut.edu.cn。

张鹏超(1977—)，男，硕士，教授。研究方向：智能控制理论与应用，计算机视觉。E-mail：snutzpc@126.com。

保正泽(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统负荷预测。E-mail：2387695195@qq.com。

唐梁彬(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：计算机视觉。E-mail：18328588531@163.com。

张恒(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：视觉 SLAM。E-mail：3210015 42@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)