

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191063

非理想电网下逆变器并网电流质量改善策略

杨龙月¹, 郭锐², 张乐¹, 刘建华¹, 郭向向³

(1. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 浙江 杭州 311200; 3. 云南师范大学泛亚商学院, 云南 昆明 650000)

摘要: 逆变器在非理想的电网条件下采用传统的电网电压前馈控制时, 其输出阻抗的相位裕度很低, 且不能很好地抑制电网电压的谐波传入控制系统, 从而很难保证其并网电流的质量。提出了一种改善在非理想电网条件下逆变器并网电流质量的方法。首先, 建立PR控制下采用传统电网电压前馈的LCL型逆变器输出阻抗模型, 提出利用带通滤波器改进的电网电压前馈策略, 提高逆变器对电网阻抗的鲁棒性。同时在PR控制器上并联多次谐波补偿器, 使其不仅能够提高逆变器对电网阻抗的鲁棒性而且能够有效地抑制电网电压谐波对逆变器并网电流的干扰, 从而改善非理想电网条件下的逆变器并网电流的质量。最后, 利用仿真和实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 电网电压前馈; 逆变器输出阻抗; 带通滤波器; 多次谐波补偿器; 并网电流质量

Improvement strategy for grid-connected current quality of an inverter under non-ideal grid conditions

YANG Longyue¹, GUO Rui², ZHANG Le¹, LIU Jianhua¹, GUO Xiangxiang³

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
2. Maintenance Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311200, China;
3. School of Pan-Asian Business, Yunnan Normal University, Kunming 650000, China)

Abstract: The phase margin of the output impedance is very low when the traditional grid voltage feed-forward control is used in an inverter under a non-ideal grid, and it cannot suppress the interference of the grid-voltage's harmonic to the output current of the inverter well. Therefore it is difficult to guarantee the quality of grid-connected current. This paper presents a control strategy to improve the grid-connected current quality of inverters under non-ideal grid conditions. First, the output impedance model of LCL inverters with traditional grid voltage feed-forward under a PR controller is established, and an improved grid voltage feed-forward strategy based on a band-pass filter is proposed to improve the robustness of inverters to grid impedance. At the same time, a multi-harmonic compensator is connected in parallel with the PR controller. It can not only improve the robustness of the inverters to the impedance of the power grid, but also effectively restrain the interference of the harmonic voltage to the grid-connected current. Therefore, the quality of grid-connected current under the non-ideal grid can be improved. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation and experiment.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51607179).

Key words: feedforward of grid voltage; output impedance of inverter; band-pass filter; multiple harmonic compensator; quality of grid-connected current

0 引言

随着传统能源的日渐短缺, 可再生能源逐渐得到了大范围的利用, 逆变器是可再生能源与电网之间的桥梁, 可以将可再生能源转化为符合并网标准的电能^[1-2]。LCL型并网逆变器在高频段具有较高的

衰减率^[3], 但其存在自身的谐振点^[4], 因此LCL型并网逆变器时常采用PR控制下的电容电流反馈策略, 它不仅能够增强系统的基波增益, 减少稳态误差, 而且能够有效地抑制LCL的谐振峰值^[5]。并网逆变器输出电流质量容易受到电网电压的影响^[6], 为了抑制电网电压的不利影响, 文献[7]提出电网电压比例前馈控制策略, 有效抑制了并网电流的谐波; 文献[8]提出电网电压全前馈控制策略, 能够有效抑制电网电压引起的并网电流谐波和不平衡分量; 文献

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助 (51607179)

[9]提出利用多重PR控制器提高谐波频率处的阻抗来降低电网电压谐波对输出电流的影响; 文献[10]提出利用谐波补偿器的方法来抑制电网电压谐波传入逆变器的控制系统。而文献[11]中指出, 传统的电网电压前馈策略忽略了会降低逆变器输出阻抗相位裕度的问题, 不利于逆变器工作的稳定性; 文献[12]中指出电网电压全前馈只适用于强电网的理想工作环境, 一旦逆变器在弱电网条件下工作时, 其很难保证良好的并网电流质量; 文献[13]中指出采用谐波补偿的方法能够抑制电网电压谐波对逆变器并网电流的干扰, 但不适用于弱电网的工作条件。为了改善逆变器的并网电流质量, 可以利用在线监测电网阻抗并实时反馈调节电容电流阻尼系数的方法^[14]; 可以采用电网电压加权前馈的方法^[15]; 可以采用基于二阶广义积分器(SOGI)的陷波前馈的方法^[16]; 可以从全局角度考虑, 采用在公共耦合点处并联RC支路的方法^[17]。也可以采用自适应谐波补偿前馈的方法^[18]。上述几种方法都能够改善逆变器在非理想电网环境下的并网电流质量, 但是相对较为复杂, 增加了系统的控制难度。

本文基于系统阻抗比的Nyquist稳定判据, 研究了一种利用带通滤波器和多次谐波补偿器改进的控制策略, 从逆变器输出阻抗的角度分析了该方法对改善其在非理想电网条件下并网电流质量的作用, 并利用仿真和实验平台验证了所提方法的有效性。

1 LCL型并网逆变器输出阻抗模型

图1为基于PR控制并含有电网电压前馈的三相LCL型并网逆变器控制结构图。 V_{in} 、 V_g 分别为直流侧输入电压、三相电网电压, H_{i1} 、 H_{i2} 和 H_v 分别为电容电流、并网电流以及电网电压采样的反馈系数, PLL为锁相环, $G_i(s)$ 是采用PR控制的电流调节器, $G_{ff}(s)$ 为所采用的电网电压前馈控制环节, I^* 为逆变器输出电流的参考值。为了简要说明下文所提的控制策略, 以电网电压比例前馈为例进行说明, 全前馈与比例前馈类似, 不做详细分析。

三相LCL型并网逆变器的 α 和 β 轴上的控制模型完全一致, 并且不存在任何的耦合, 下文以 α 轴上的控制模型为例进行说明。图1在 α 轴上的控制框图可以简化为如图2(a)所示, 其中 $V_{g\alpha}$ 为网侧电压经坐标变换后得到的 α 轴上的电压量, $G_{inv}(s)$ 为逆变桥的传递函数, 由于数字控制存在一拍延迟, 而零阶保持器给控制系统引入了0.5拍延迟, 因此逆变桥的传递函数可以等效为式(1)^[19], 其中 V_{ui} 为

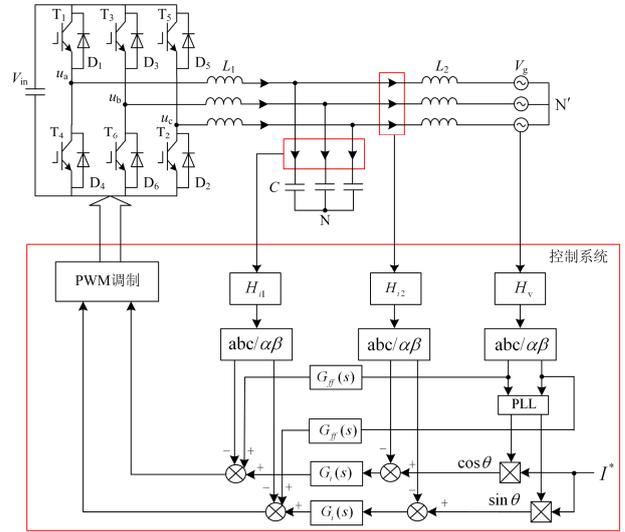


图1 两相静止坐标系下的三相LCL型并网逆变器系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of three-phase LCL grid-connected inverter system in the two-phase stationary frame

载波幅值, T_s 为系统的采样周期, 调制信号到逆变桥输出电压的传递函数增益定义为 K_{pwm} , 其数值等于 $V_{in}/2V_{ui}$, 虽然控制延时对逆变器存在一定的影响, 但离散域与连续域上的逆变器阻抗模型特性在中频段基本一致^[20], 且文章主要针对逆变器的中频段进行分析, 因此文章是基于连续域模型进行分析的。

$$G_{inv}(s) = \frac{V_{in}}{2V_{ui}} e^{-1.5sT_s} \quad (1)$$

为了简化控制模型, 将 $G_{ff}(s)$ 的比较点前移至 $G_i(s)$ 的输入端, 进一步得出如图2(b)所示的系统控制框图。其中 $G_{x1}(s)$ 和 $G_{x2}(s)$ 的表达式如下所示:

$$G_{x1}(s) = \frac{G_{inv}(s)G_i(s)}{s^2L_1C + sCH_{i1}G_{inv}(s) + 1} \quad (2)$$

$$G_{x2}(s) = \frac{s^2L_1C + sCH_{i1}G_{inv}(s) + 1}{s^3L_1L_2C + s^2L_2CH_{i1}G_{inv}(s) + s(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

再将图2(b)中调整后的电网电压前馈点从 $G_{x1}(s)$ 的输入端移动至其输出端, 进一步化简便可以得到图2(c)所示的控制框图。图中:

$$F_f(s) = 1 - \frac{G_{ff}(s)}{G_i(s)} G_{x1}(s) \quad (4)$$

$F_f(s)$ 项是等效变换之后的含有电网电压前馈的控制环节, 当控制系统中无电网电压前馈时, 取 $F_f(s)$ 环节为1。

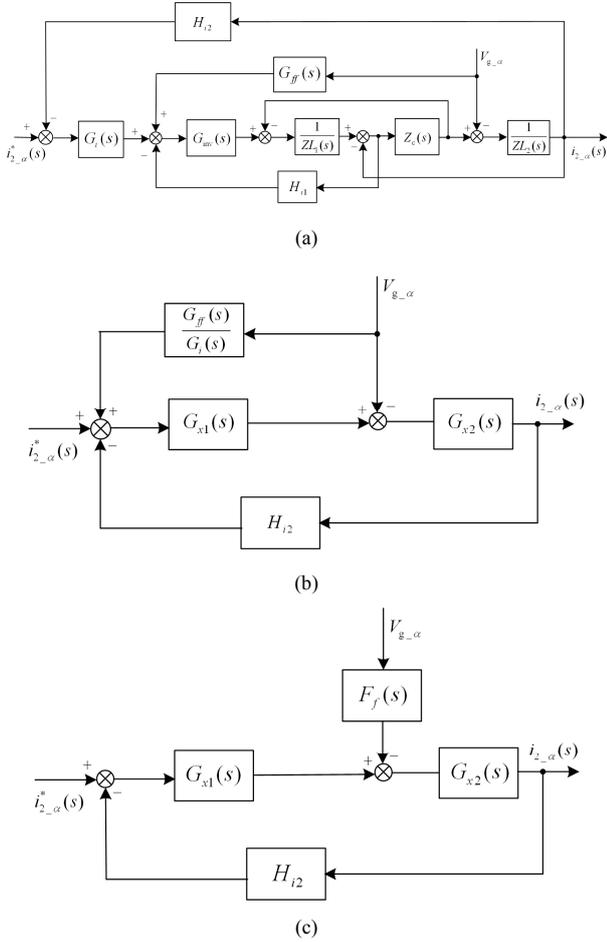


图2 α 轴上三相LCL并网逆变器含电网电压前馈的输出阻抗推导

Fig. 2 Derivation of output impedance of three-phase LCL grid-connected inverter with grid voltage feedforward on α axis

由图2(c)便可以求出逆变器的并网电流为

$$i_{2-\alpha}(s) = \frac{T_m(s)}{1+T_m(s)} \frac{1}{H_{i2}} i_{2-\alpha}^*(s) - \frac{G_{x2}(s)}{1+T_m(s)} F_f(s) V_{g-\alpha}(s) = \frac{T_m(s)}{1+T_m(s)} \frac{1}{H_{i2}} i_{2-\alpha}^*(s) - \frac{1}{Z_0(s)} V_{g-\alpha}(s) \quad (5)$$

其中, $T_m(s)$ 为图2(c)中的环路增益, 表示 $G_{x1}(s)$ 、 $G_{x2}(s)$ 和 H_{i2} 三者的乘积, $Z_0(s)$ 即为LCL型并网逆变器的输出阻抗:

$$Z_0(s) = \frac{1+T_m(s)}{G_{x2}(s)F_f(s)} \quad (6)$$

将式(1)~式(4)代入式(6)可得

$$Z_0(s) = \frac{s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_{i1} G_{inv}(s) + s(L_1 + L_2) + G_f(s) H_{i2} G_{inv}(s)}{s^2 L_1 C + s C H_{i1} G_{inv}(s) + 1 - G_{ff}(s) H_v G_{inv}(s)} \quad (7)$$

根据式(7), 分别令 $G_{ff}(s)$ 环节等于0和电网电压前馈的传递函数, 便可以得出两种情况下的逆变器输出阻抗。其中电网电压全前馈根据文献[21]有

$$G_{ff}(s) = \frac{1}{K_{pwm}} + H_{i1} C s + \frac{L_1 C}{K_{pwm}} s^2 \quad (8)$$

2 逆变器对电网阻抗的鲁棒性和对电网电压谐波干扰的抑制能力

当电网处于弱电网条件下, 其等效阻抗的波动范围较大, 很容易导致逆变器失稳^[22-23]。根据等式(6)并利用诺顿定理, 可以得到逆变器接入弱电网的 α 轴上的等效模型如图3所示。其中 $Z_g(s)$ 为电网的等效阻抗, $i_0(s)$ 为逆变器输出电流, $V_{g-\alpha}(s)$ 为电网电压在 α 轴上的分量。

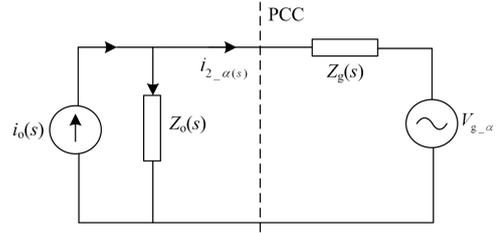


图3 逆变器接入弱电网的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of inverter connecting to weak power grid

根据图3, 结合叠加定理便可以获得逆变器在 α 轴上的并网电流为

$$i_{2-\alpha}(s) = \frac{Z_0(s)}{Z_0(s) + Z_g(s)} i_0(s) - \frac{1}{Z_0(s) + Z_g(s)} V_{g-\alpha}(s) = \left(i_0(s) - \frac{V_{g-\alpha}(s)}{Z_0(s)} \right) \left(\frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_0(s)} \right) \quad (9)$$

式(9)中, 当并网逆变器处于理想的强电网条件下 ($Z_g(s) = 0$) 稳定时, 说明左括号项不存在右半平面极点, 而在弱电网条件下时, 系统稳定性主要由右括号项决定, 即 $Z_g(s)/Z_0(s)$ 项。

利用Nyquist稳定判据对系统阻抗比进行分析, 当 $Z_g(s)$ 与 $Z_0(s)$ 两个传递函数幅频曲线之间不存在交截点时, 逆变器能够稳定运行^[24]; 而当两者之间幅频曲线存在交截点时, 此时必须满足 $Z_g(s)$ 与 $Z_0(s)$ 两者之间的幅频曲线交截点相位差在 $\pm 180^\circ$ 之间。定义二者之间的相位差为 $\Delta\theta$, f_k 为 $Z_g(s)$ 与 $Z_0(s)$ 幅频曲线交截点的频率值, 则有

$$\Delta\theta = \angle Z_g(f_k) - \angle Z_o(f_k) \quad (10)$$

图 4 是采用 PR 控制时, 有无电网电压前馈下所得出的逆变器的输出阻抗与电网等效阻抗的伯德图。其中 Z_g 为电网的等效阻抗, Z_{o1} 为没有采用电网电压前馈时的逆变器输出阻抗, Z_{o2} 为含有电网电压前馈的逆变器输出阻抗。相关参数如第 4 节的表 1 所示。

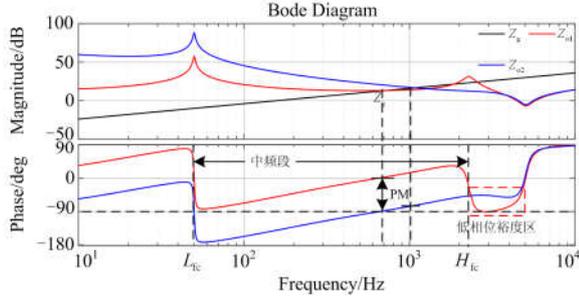


图 4 有无电网电压前馈逆变器的输出阻抗伯德图

Fig. 4 Bode plots of the output impedance with and without the grid voltage feedforward of the inverter

从图 4 中可以发现, Z_{o1} 虽然在较宽的频率段内保持较高的相位裕度, 但是由于文中阻抗模型考虑了 1.5 拍的控制延时, 使得其存在低相位裕度区, 如果 Z_g 与 Z_{o1} 的幅频曲线交截点刚好位于该区域内, 则会导致系统不稳定; Z_{o2} 大部分处于负相位裕度区, 反而在 Z_{o1} 的低相位裕度区保持较高的相位裕度。

为保证逆变器的并网电流不受电网电压谐波的干扰, 常常采用多次谐波补偿器并联 PR 控制器的方法来抑制特定次谐波电压传入控制系统^[25-26], 却忽略了谐波补偿器存在的负相移会导致逆变器输出阻抗的相位裕度降低的问题, 如图 5 所示。图中 Z_{o3} 为采用 5、7 次谐波补偿器后的逆变器输出阻抗, H_{C5} 和 H_{C7} 分别为 5、7 次谐波补偿器。可见, 如果逆变器输出阻抗与电网阻抗的交截点位于图 5 中的负相位裕度区, 则逆变器不能稳定运行。

3 改善非理想电网下逆变器并网电流质量的方法

3.1 改进的电网电压前馈策略

从图 4 中可知, 如果逆变器输出阻抗的相频曲线能够在图 4 中的低相位裕度区保持与 Z_{o2} 一致, 而在中频段保持与 Z_{o1} 一致, 则能够保证逆变器输出阻抗无论在中频段还是在低相位裕度区都能够具有较高的相位裕度。

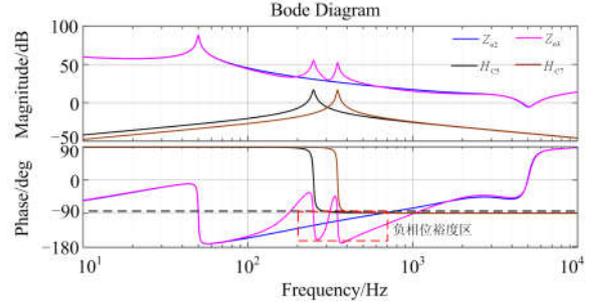


图 5 电网电压前馈基础上多次谐波补偿的逆变器输出阻抗伯德图

Fig. 5 Bode plots of the output impedance of grid voltage feedforward with multiple harmonic compensation for inverter

为此, 文章提出了利用带通滤波器改进传统的电网电压前馈的方法, 其控制结构如图 6 所示, BPF 为带通滤波器环节。BPF 的传递函数如式(11)所示。

$$BPF(s) = \frac{A_0 \omega_{Lc}^2 s^2}{(s^2 + \frac{\omega_{Lc}}{\xi} s + \omega_{Lc}^2)(s^2 + \frac{\omega_{hc}}{\xi} s + \omega_{hc}^2)} \quad (11)$$

式中: A_0 为 BPF 的增益; ω_{hc} 和 ω_{Lc} 分别为其上下限的截止角频率; ξ 为阻尼系数(一般取值为 0.707)。

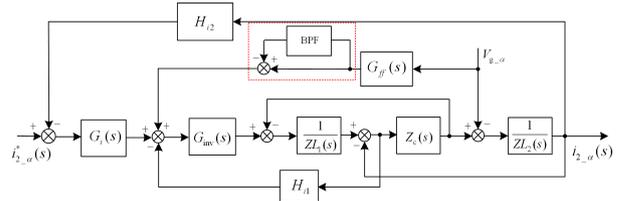


图 6 改进的电网电压前馈方法

Fig. 6 An improved grid-voltage feedforward method

本文所提出的利用 BPF 改进传统电网电压前馈的方法, 根据图 4 所示的 H_{1c} 和 L_{1c} 的频率值分别设置 BPF 的上下限截止角频率值为 4600π 、 100π , BPF 的增益如果设置的过小则不能提高逆变器阻抗在中频段的相位裕度, 而设置的过大则会导致逆变器阻抗的幅频曲线幅值降低, 基波增益减小, 不利于系统的稳定^[27]。因此文中在考虑逆变器输出阻抗与电网阻抗的交截点对应的相位裕度的基础上, 取 BPF 的增益值为 200。

图 7 为改进后的逆变器输出阻抗 Z_o 的伯德图。在所设置的带通频率范围内, 由于 BPF 的作用, 使得在该频率段内 Z_o 的相频曲线接近于 Z_{o1} , 而在 Z_{o1} 自身存在的低相位裕度区域则接近于 Z_{o2} 。从而使得逆变器的输出阻抗在整个频率段内既保证拥有 Z_{o2} 的高幅值又弥补了 Z_{o2} 存在负相位的缺点。

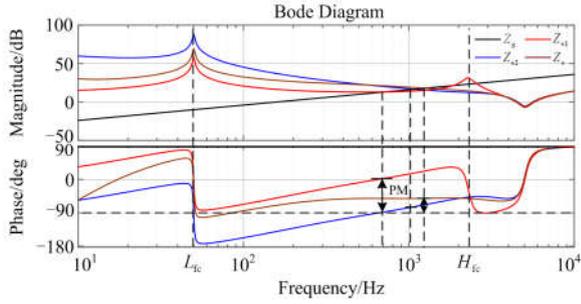


图 7 改进后的逆变器输出阻抗伯德图

Fig. 7 Bode diagram of output impedance of improved inverters

3.2 弱电网下抑制电网电压谐波的方法

改进的电网电压前馈方法虽然提高了逆变器对电网阻抗的鲁棒性，但并不能很好地抑制电网电压的谐波传入控制系统，很容易导致逆变器输出电流中含有电网电压的同次谐波，而仅仅采用谐波补偿器的方法则存在图 5 所分析的缺点。因此，本文采用在改进的电网电压前馈基础上，利用 PR 控制器并联多次谐波补偿器的方法，既能提高逆变器对电网阻抗的鲁棒性又能抑制电网电压谐波。其整体的控制结构如图 8 所示。

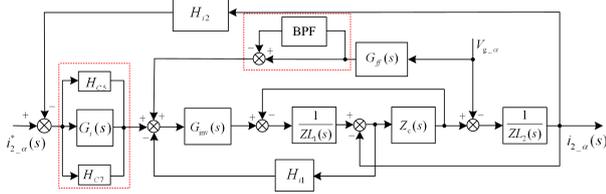


图 8 在改进的电网电压前馈基础上采用多次谐波补偿的方法

Fig. 8 Multi-harmonic compensation method based on improved feed-forward voltage of power grid

谐波补偿器的传递函数为

$$H_C(s) = \frac{A_0 \omega_b s}{s^2 + \omega_b s + \omega_h^2} \quad (12)$$

式中： A_0 为 $H_C(s)$ 的增益； ω_b 为带宽； ω_h 为所要补偿的角频率值，文章以电网电压存在 5、7 次谐波为例阐述，其余谐波类似。当逆变器采用如图 8 所示的控制策略时其输出阻抗的伯德图如图 9 所示。

Z_{o4} 为在改进的电网电压前馈基础上，采用 PR 并联多次谐波补偿器时的逆变器输出阻抗。可见， Z_{o4} 既保证了一定的相位裕度，又能够在谐波补偿频率处呈现高幅值，即抑制电网电压的谐波传入控制系统，从而能够很好地改善非理想电网条件下逆变器的并网电流质量。

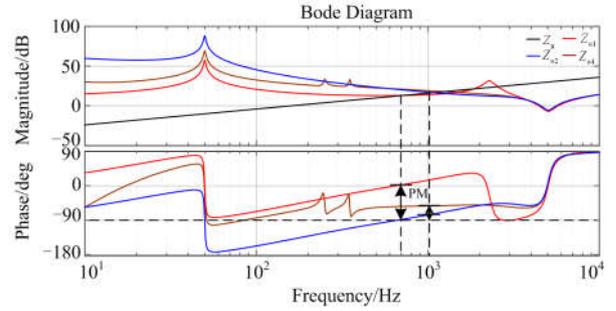


图 9 图 8 控制策略下的逆变器输出阻抗伯德图

Fig. 9 Bode plots of the output impedance of inverter under the method of Fig. 8

4 仿真与实验验证

4.1 仿真分析

为了验证文章所提出的控制策略是否有效，利用 Simulink 软件搭建了一个 20 kW 的三相 LCL 型并网逆变器的仿真模型，其相关参数如表 1 所示。

表 1 并网逆变器相关参数

Table 1 Relevant parameters of the grid-connected inverter

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 V_m	800 V	载波幅值 V_{bi}	1 V
电网相电压 V_g	220 V	电容电流反馈系数 H_{i1}	0.18
额定功率 P_o	20 kW	并网电流反馈系数 H_{i2}	0.05
开关频率 f_{sw}	10 kHz	电网电压采样系数 H_V	1
逆变器侧电感 L_1	800 μ H	PR 调节器比例系数 K_p	0.65
滤波电容 C	15 μ F	PR 调节器比例系数 K_i	75
网侧电感 L_2	110 μ H	电网等效阻抗 L_g	1 mH

图 10 中给出了不同条件下的仿真结果。当 $L_g=0$ 时，采用 PR 控制下的传统电网电压前馈策略，此时逆变器的并网电流见图 10(a)，其能够稳定运行，且谐波含量少；而当 $L_g=1$ mH 时，由图 4 的分析可知，此时 Z_g 与 Z_{o2} 的幅频曲线交截点的相位裕度很低，系统不稳定，此时的并网电流如图 10(b)所示；当 $L_g=1$ mH 时，采用 3.1 节改进的电网电压前馈方法时，保持其他条件不变，根据图 7 的分析可知，此时 Z_g 与 Z_o 的幅频曲线交截点处的相频曲线相位较高，系统能够稳定运行，其输出电流如图 10(c)所示，谐波主要分布在阻抗交截点频率附近，电流的 $THD=1.8\%$ ，满足并网要求；当 $L_g=3$ mH 时，改进的电网电压前馈策略仍然能够保证逆变器稳定工作，证实了所提方法对电网阻抗具有很强的鲁棒性，其输出电流如图 10(d)所示，由于 L_g 变大，使电流谐波随着阻抗交截点向低频移动，但 $THD=1.27\%$ 仍然满足并网标准。

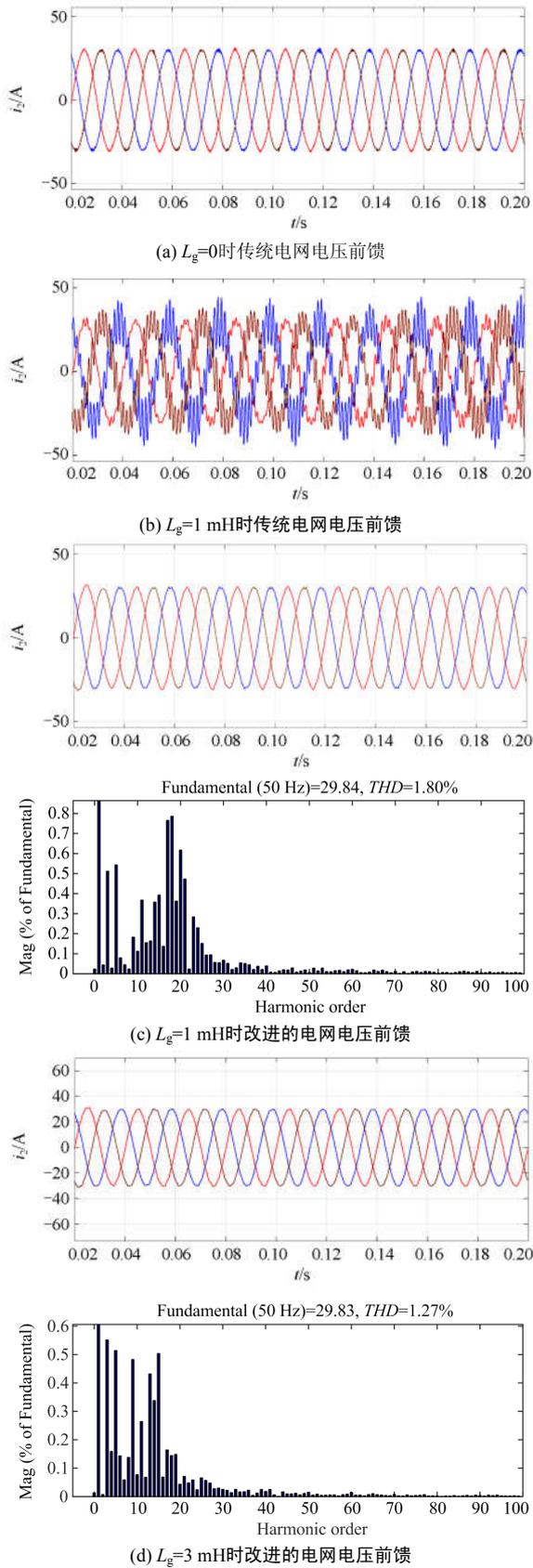


图10 不同条件下逆变器输出电流

Fig. 10 Output current of inverter under different conditions

图 11 给出了 $L_g=1$ mH, 且电网电压加入各 10% 的 5、7 次谐波时的逆变器并网电流的波形。由图 11(a)可知, 虽然改进的电网电压前馈能够在 $L_g=1$ mH 时稳定运行, 但在 0.06 s 时电网电压加入各 10% 的 5、7 次谐波, 此时逆变器输出电流发生畸变, 含有大量的 5、7 次谐波; 而相同条件下, 采用 3.2 节所提出的控制策略, 逆变器仍然能够稳定运行, 输出电流 $THD=2.25%$, 5、7 次谐波含量低, 如图 11(b)所示。说明该方法能够很好地改善非理想电网条件下逆变器并网电流的质量, 符合上文的理论分析结果。

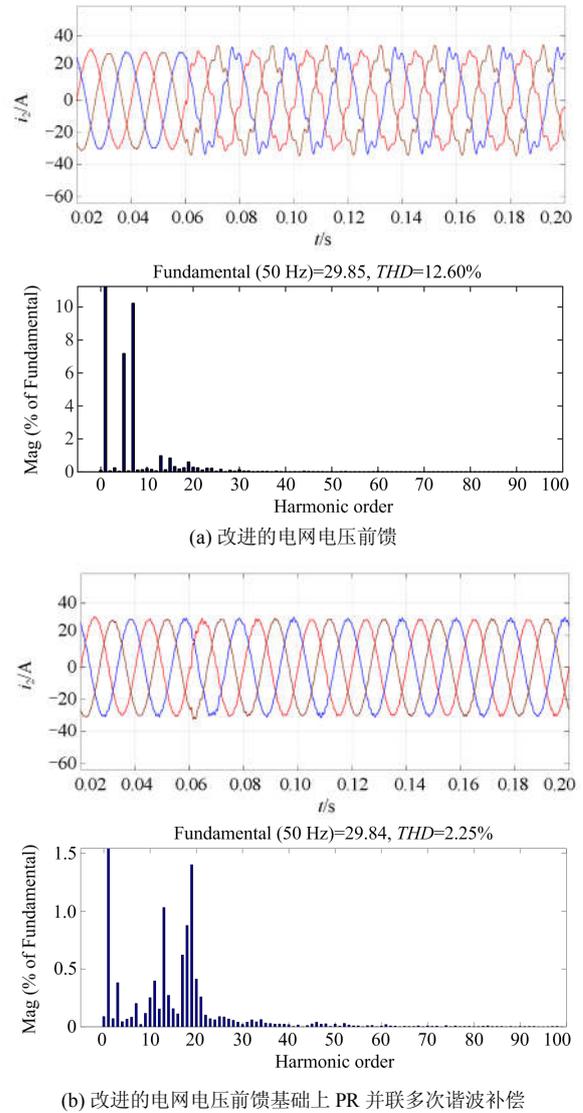


图11 $L_g=1$ mH, 电网电压含有谐波时逆变器输出电流

Fig. 11 $L_g=1$ mH, output current of inverter with harmonic voltage in power grid

4.2 实验验证

为了验证文章所提方法的有效性, 在实验室搭

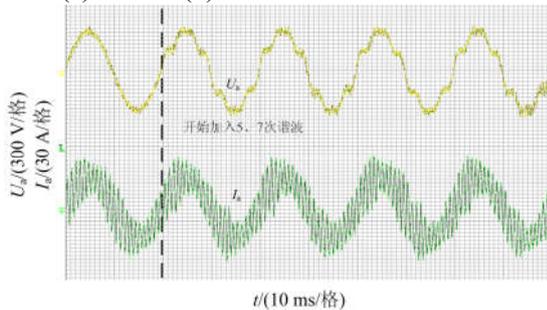
建了一台 20 kW 的三相 LCL 型并网逆变器，其主要的参数与仿真参数相同，其中采样频率为 20 kHz，开关频率为 10 kHz。实验平台如图 12 所示。



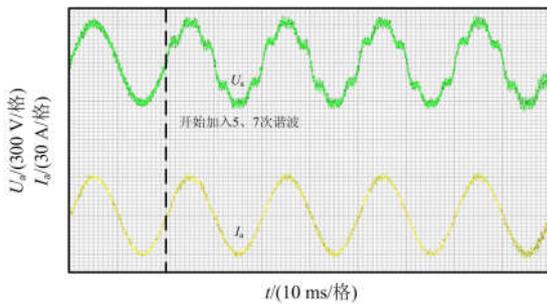
图 12 逆变器实验平台

Fig. 12 Experimental platform of inverter

通过电网模拟器外接 1 mH 电感模拟弱电网条件，并同时设置电网电压含有各 10% 的 5、7 次谐波，在采用传统电网电压前馈控制策略与本文 3.2 节所提的改进的控制策略时，其并网电流波形分别如图 13(a)和图 13(b)所示。



(a) 传统电网电压前馈策略



(b) 改进的控制策略

图 13 不同控制策略下, $L_g=1$ mH, 电网电压含有谐波时 a 相电压和逆变器输出 a 相电流

Fig. 13 Under different control strategies, $L_g=1$ mH, a-phase voltage and a-phase output current of inverter when power grid voltage contains harmonics

从图 13(a)、图 13(b)的左部分对比分析可以发现，在弱电网条件下，传统的电网电压前馈策略并网电流质量很差，发生了谐振，而本文所提出的改进的控制策略则能够在弱电网下保证并网电流的质量，与仿真分析结果基本一致；对比分析图 13(a)、图 13(b)的右部分实验波形，在加入 5、7 次谐波后，在传统控制策略下，逆变器并网电流畸变更严重，而采用文章所提的改进后的控制策略，虽然处于弱电网条件下，并且电网电压中含有较大的谐波电压，但逆变器的并网电流仍然具备较好的质量，与仿真分析结果基本一致，证实了所提出的改进的控制策略的有效性。

5 结论

(1) LCL 型并网逆变器采用传统的电网电压前馈时，其对电网阻抗的鲁棒性低，且不能很好地抑制电网电压谐波对其并网电流的干扰；为了抑制电网电压谐波的干扰而采用多次谐波补偿的方法又存在降低逆变器输出阻抗相位裕度的缺点。

(2) 本文所提的基于带通滤波器和多次谐波补偿器改进的控制策略，既能够提高 LCL 型并网逆变器对电网阻抗的鲁棒性，又能够对电网电压谐波干扰逆变器并网电流起到很好的抑制作用，从而有效改善非理想电网条件下逆变器并网电流的质量。

参考文献

[1] PENA-ALZOLA R, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2642-2646.

[2] 潘冬华, 阮新波, 王兴华, 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): 1-10. 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]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10.

[3] 李圣清, 张威威. 电容电流反馈的 LCL 滤波器网压前馈控制研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(2): 57-59, 75. LI Shengqing, ZHANG Weiwei. Research on network voltage feed-forward control of LCL filter with capacitive current feedback[J]. Power Electronics Technology, 2019, 53(2): 57-59, 75.

[4] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.

- MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 96-102.
- [5] 王秀云, 毛瑞鹏, 田璧源, 等. 基于 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(7): 121-125.
- WANG Xiuyun, MAO Ruipeng, TIAN Biyuan, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PI and quasi-PR control[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(7): 121-125.
- [6] 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): 133-142.
- 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]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 133-142.
- [7] XIE Shaojun, XU Jinming, TANG Ting. Improved control strategy with grid-voltage feedforward for LCL-filter-based inverter connected to weak grid[J]. *IET Power Electronics*, 2014, 7(10): 2660-2671.
- [8] XUE Mingyu, ZHANG Yu, KANG Yong, et al. Full feedforward of grid voltage for discrete state feedback controlled grid-connected inverter with LCL filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(10): 4234-4247.
- [9] 王黎绚, 靳伟, 刘海龙, 等. 基于有源阻尼的并网逆变器多谐振 PR 控制[J]. *电力电子技术*, 2016, 50(9): 67-70.
- WANG Lixuan, JIN Wei, LIU Hailong, et al. A multi-resonant PR controller for LCL grid-connected inverters with active damping[J]. *Power Electronics*, 2016, 50(9): 67-70.
- [10] 吕永灿, 林桦, 杨化承, 等. 基于多谐振控制器和电容电流反馈有源阻尼的 PWM 变换器电流环参数解耦设计[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(27): 44-51.
- LÜ Yongcan, LIN Hua, YANG Huacheng, et al. Decouple design of current loop parameters for PWM converters based on multi-resonant controllers and capacitor current feedback active damping[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(27): 44-51.
- [11] LI Weiwei, RUAN Xinbo, PAN Donghua, et al. Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(6): 2237-2250.
- [12] 耿乙文, 田芳芳, 孙帅, 等. 一种基于虚拟同步发电机的电流谐波抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(5): 1040-1050.
- GENG Yiwen, TIAN Fangfang, SUN Shuai, et al. A method of current harmonics suppression based on VSG[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(5): 1040-1050.
- [13] 孙玉坤, 孙海洋, 张亮. 中点箝位式三电平光伏并网逆变器的三单相 Quasi-PR 控制策略[J]. *电网技术*, 2013, 37(9): 56-62.
- SUN Yukun, SUN Haiyang, ZHANG Liang. Three-phase independent quasi-PR control strategy for neutral point clamped tri-level grid-connection photovoltaic inverter[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(9): 56-62.
- [14] 潘冬华, 阮新波, 王学华, 等. 增强 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的控制参数设计[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 2558-2566.
- PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Controller design for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid-impedance variation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 2558-2566.
- [15] 李明, 张兴, 杨莹, 等. 弱电网下基于加权系数的电网电压前馈控制策略[J]. *电源学报*, 2017, 15(6): 10-18.
- LI Ming, ZHANG Xing, YANG Ying, et al. Grid voltage feedforward control strategy based on weighting coefficient in weak grid[J]. *Journal of Power Supply*, 2017, 15(6): 10-18.
- [16] 尹有为, 井敬, 杨树德, 等. 增强 LCL 逆变器对弱电网适应能力的反馈控制[J]. *电气传动*, 2018, 48(4): 17-21.
- YIN Youwei, JING Jing, YANG Shude, et al. Feedforward control for improving LCL inverter's adaptability to weak grid[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(4): 17-21.
- [17] KATO T, INOUE K, AKIYAMA Y, et al. Stability analysis for grid-connected LCL-type inverter with digital control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 136(9): 615-621.
- [18] 刘景晖, 郑益慧, 姚钢, 等. 自适应特征谐波消除策略的并网逆变器电流跟踪优化方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 126-134.
- LIU Jinghui, ZHENG Yihui, YAO Gang, et al. Optimized current tracking method for grid-connected inverter with adaptive characteristic harmonic elimination[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 126-134.
- [19] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器电流控制性能的双采样模式实时运算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(6): 1445-1454.
- YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A real-time computation method with dual sampling modes to

- improve the current control performances of LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1445-1454.
- [20] 盘宏斌, 欧思程, 刘林海, 等. LCL 型并网逆变器数字单环控制延时影响与稳定域分析设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 85-90.
- PAN Hongbin, OU Sicheng, LIU Linhai, et al. Influence of delay and stable domain analysis and design based on digital single-loop control of grid-connected inverter with LCL-filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 85-90.
- [21] ZHOU Qingfeng, WANG Xuehua, RUAN Xinbo, et al. An active capacitor converter for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter against grid impedance variation[C] // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 26-30, 2017, Tampa, FL, USA: 3608-3613.
- [22] 郑征, 黄旭, 杨明. 弱电网下基于复数滤波器的并网电压前馈控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 70-75.
- ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming. Grid voltage feedforward control strategy for weak grid based on complex filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 70-75.
- [23] 欧阳逸风, 邹宇. 弱电网条件下并网逆变器的锁相环静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 74-79.
- OUYANG Yifeng, ZOU Yu. Static stability analysis of phase-locked loop in grid-connected inverters under weak grid condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 74-79.
- [24] 朱武, 刘雅娟. 大型光伏电站谐波谐振机理研究[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 121-130.
- ZHU Wu, LIU Yajuan. Harmonic resonance mechanism study of large-scale photovoltaic power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 121-130.
- [25] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.
- HE Yaqing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on stability of the improved control strategy for photovoltaic inverters[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [26] 沈渭程, 刘丽娟, 董开松, 等. 光伏并网 NPC 三电平逆变器调制算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 69-75.
- SHEN Weicheng, LIU Lijuan, DONG Kaisong, et al. Research on modulation algorithm of NPC three level inverter for photovoltaic grid connection[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 69-75.
- [27] 许国瑞, 尹忠东, 刘鹏, 等. 提升电力系统稳定性的新能源发电场同步电机对并网技术[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 44-50.
- XU Guorui, YIN Zhongdong, LIU Peng, et al. Serving power system stability by motor-generator pair in renewable energy power plant[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 44-50.

收稿日期: 2019-09-01; 修回日期: 2019-12-24

作者简介:

杨龙月(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网和有源滤波技术; E-mail: 644653327@qq.com

郭锐(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为LCL型并网逆变器多机并联谐振抑制; E-mail: 857967307@qq.com

张乐(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变器并网控制。E-mail: 516641603@qq.com

(编辑 魏小丽)