DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.269 中图分类号：TM464 文献标志码：A

一种提高并网逆变器无源性的阻抗重塑方法

徐海亮(中国电源学会高级会员)，张伟杰，林鸿彬
(中国石油大学(华东)新能源学院，青岛 266580)

摘要：逆变器作为新能源发电系统与电网之间的接口，发挥着至关重要的作用。然而，弱电网环境下电网阻抗的变化、并联逆变器之间的相互作用及控制系统中存在的延时等均可能威胁系统的稳定运行。对此，基于无源性理论，在传统比例电压前馈的基础上，提出1种新的虚拟阻抗重塑策略，能够消除奈奎斯特频率以下的非无源区域，将逆变器输出阻抗相位保持在[−90°, 90°]之内。算例研究表明，该方案可使逆变器并联系统在电网阻抗、逆变器数量及参数等变化下，保持良好的稳定性能。

关键词：并网逆变器；前馈控制；稳定性；无源性

Impedance Remodeling Method for Improving Passivity of Grid-connected Inverters

XU Hailiang, *Senior Member*, *CPSS*, ZHANG Weijie, LIN Hongbin
(College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: As the interface between a new energy power generation system and power grid, inverters play an important role. However, the stable operation of the system may be threatened by the changes in grid impedance in a weak grid environment, interaction between parallel inverters and delay in the control system. Under this background, a novel virtual impedance remodeling strategy based on the passivity theory and traditional proportional voltage feedforward is proposed, which can eliminate the non-passive region below the Nyquist frequency and keep the inverter output impedance phase within [−90°, 90°]. The results of numerical examples show that the proposed scheme can keep a good stability of the inverter parallel system under changes in grid impedance, number of inverters and parameters.

Keywords: Grid-connected inverter; feedforward control; stability; passivity

随着全球能源危机、环境污染问题日益加剧，风能、太阳能等新型能源发电技术得到了广泛关注[1]。作为新能源与电网之间的接口，并网逆变器是将电能高质量注入电网的关键装备。

与单电感L滤波器、LC滤波器等相比，LCL滤波器因其可有效提高滤波器在高频段的衰减特性等优点[2]，得到广泛应用。对于LCL滤波器本身固有的谐振，一般采用有源阻尼策略来抑制其固有谐振峰，然而控制系统中存在的控制延时会导致有源阻尼引入的虚拟阻抗出现负实部，降低系统的稳定性。目前，可以通过改进逆变器的控制方法或采样方式来减小数字控制延时的影响，还可以通过优化LCL参数来改善并网逆变器控制效果[3]。文献[4]利用陷波器相位超前环节对控制延时的相位滞后进行补偿；文献[5]则通过改变采样频率，实现1个开关周期多次采样，解决了延时的影响。

电流源控制模式是当前并网逆变器应用于新能源发电的主要模式[6]。在这种模式下，电网阻抗

收稿日期：2022-05-04；**修回日期：**2022-07-21，2022-07-29；
录用日期：2022-08-01；**网络首发日期：**2022-09-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077222)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077222

存在、多逆变器并联可能会引起等效电网阻抗波动，使系统的稳定裕度降低，导致输出电流谐波甚至整个系统不稳定[7]。文献[8]基于电网阻抗测量自适应调整开环增益，提高了控制策略的鲁棒性，但该方法拥有一定的测量误差，而且会给控制系统带来额外的计算负担；文献[9]提出了以系统状态变量误差构造的 Lyapunov 函数的并网逆变器控制策略，获得了较好的控制效果，值得注意的是，电网阻抗的变化还会影响锁相环 PLL(phase locked loop)的性能，从而导致系统不稳定；对此，文献[10]分析了传统 PLL 的主要弊端，利用二阶振荡环节代替传统 PI 控制器改进锁相环，有效解决了鲁棒性降低的问题；文献[11]建立了包含电网阻抗、PLL 和电流控制环相互作用的小信号模型，提出了 1 种抑制振荡的并网逆变器参数设计方法；文献[12]则仅通过电网电流反馈准确识别电网相位，省去了 PLL 环节。

在实际多逆变器并联系统中，逆变器参数及控制方式不尽相同，且从并网点看电网阻抗也会有所差异，这导致上述分析方法和结论难以直接适用。针对多逆变器并联并网系统，无源性判据是一种直观分析逆变器与电网之间交互稳定性的方法[13-14]。若每台逆变器输出阻抗是无源的，则无论并联逆变器数量、参数如何，其并联系统也是无源的[15]，进一步地，其与电网阻抗形成的互联系统是稳定的[16]。文献[17]对 LCL 逆变器无源特性进行分析，得到逆变器输出阻抗具有负实部的频段，通过在前馈路径中增加补偿滤波器，有效消除了逆变器输出阻抗的负实部，但这也相应增加了系统成本及复杂性；文献[18]根据无源性理论，引入双二阶滤波器，提升了逆变器输出阻抗的无源区域，然而双二阶滤波器会增加参数选择的困难度及算法的复杂性。

针对上述不足，本文根据无源性理论提出 1 种无需增加滤波器或传感器就能提高逆变器输出阻抗无源性的控制策略，可降低系统的成本和复杂度。首先，建立 LCL 并网逆变器阻抗模型，对传统公共耦合点 PCC(point of common coupling)电压比例前馈策略对无源性的影响进行分析。然后，通过矢量图选择合适的电压前馈系数、串联虚拟阻抗等来增加逆变器输出阻抗无源区域，使得无论电网阻抗及并联逆变器参数、数量如何，都可以保证整个并联系统的稳定性。最后，通过电磁暂态仿真及相应实验，验证理论分析的正确性和所提控制策略的有效性。

1 LCL 型并网逆变器阻抗建模

典型的三相 LCL 并网逆变器结构如图 1 所示。图中：Z_{L_1} 和 Z_{L_2} 分别为逆变器及网侧电感阻抗；Z_C 为电容阻抗；Z_{g} 为电网阻抗，其表达式分别为

$$\begin{cases} Z_{L_1} = sL_1 \\ Z_{L_2} = sL_2 \\ Z_C = \dfrac{1}{sC} \\ Z_{\mathrm{g}} = sL_{\mathrm{g}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：L_1 和 L_2 分别为逆变器及网侧的滤波电感；C 为滤波电容；L_{g} 为网侧电感。

令 u_{g}、u_{PCC} 分别为电网电压、PCC 电压，控制环节中 G_{PR} 为电流控制器，电容电流通过反馈系数 H_1 构造虚拟阻抗来提高逆变器稳定性[19-21]。

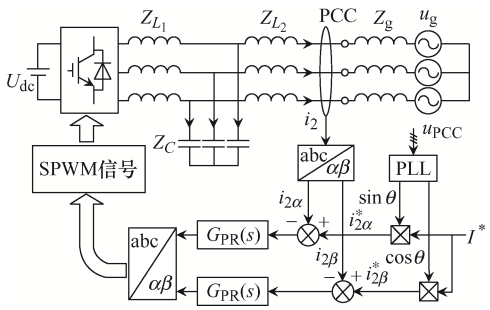


图 1 三相 LCL 并网逆变器结构

Fig. 1 Structure of three-phase LCL grid-connected inverter

与 dq 坐标系下的控制方式相比，$\alpha\beta$ 坐标系下可以有效避免耦合影响，并且采用比例谐振 PR (proportion resonance)控制器依然可以对并网电流实现无静差控制，其中 PR 控制器传递函数 $G_{\mathrm{PR}}(s)$ 为

$$G_{\mathrm{PR}}(s) = K_{\mathrm{p}} + \frac{K_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{c}}s}{s^2 + 2\omega_{\mathrm{c}}s + \omega_0^2} \tag{2}$$

式中：K_{p} 为比例系数；K_{r} 为谐振系数；ω_{c} 为截止

频率；ω_0 为谐振频率。

并网逆变器的电流控制环中，通常存在 1.5 个采样周期的控制延时。目前，采用延时补偿[4]、即时采样[5]等方式可以减小甚至消除控制延时的影响，但为了确保所提方案的普遍性，本文未采用减少控制延时的方法。控制延时 $G_d(s)$ 的表达式为

$$G_d(s)=e^{-1.5sT_s} \tag{3}$$

数字控制延时通常可用二阶 pade 近似[22]，即

$$G_d(s)\approx\frac{1-0.75sT_s+0.083(1.5sT_s)^2}{1+0.75sT_s+0.083(1.5sT_s)^2} \tag{4}$$

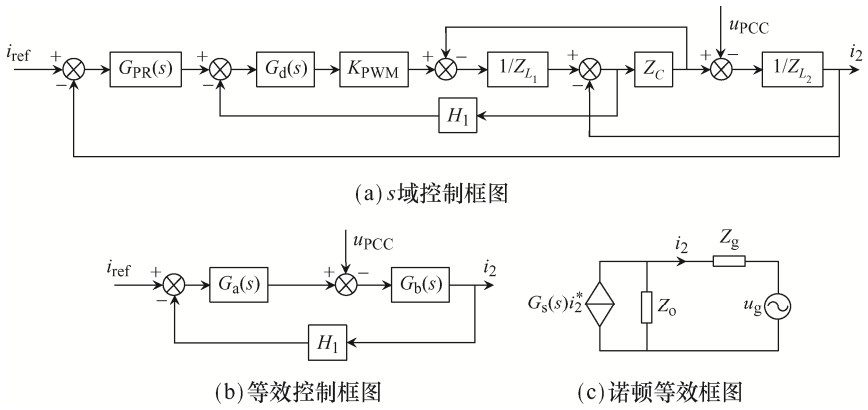
PWM 逆变器的等效增益 K_{PWM} 可以表示为

$$K_{PWM}=\frac{U_{dc}}{U_{tri}} \tag{5}$$

式中：U_{dc} 为直流侧电压；U_{tri} 为载波幅值。

三相 LCL 并网逆变器控制框图如图 2 所示。将图 2(a)所示三相 LCL 并网逆变器控制结构进行等效变化，得到图 2(b)，其中 $G_a(s)$和 $G_b(s)$的表达式分别为

$$\begin{cases}G_a(s)=\dfrac{K_{PWM}G_d(s)G_{PR}(s)}{s^2L_1C+sCH_1K_{PWM}G_d(s)+1}\\ G_b(s)=\dfrac{s^2L_1C+sCH_1K_{PWM}G_d(s)+1}{s^3L_1L_2C+s^2L_2CH_1K_{PWM}G_d(s)+s(L_1+L_2)}\end{cases} \tag{6}$$



(a) s域控制框图

(b)等效控制框图　　(c)诺顿等效框图

图 2　三相 LCL 并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of three-phase LCL grid-connected inverter

通过图 2(b)，进一步可得到图 2(c)并网逆变器的诺顿等效模型。逆变器输出电流 I_g 的表达式为

$$I_g=G_s(s)i_2-\frac{U_{PCC}}{Z_o(s)} \tag{7}$$

式中：$Z_o(s)=\dfrac{G_a(s)G_b(s)+1}{G_b(s)}$；$G_s(s)=\dfrac{G_a(s)G_b(s)}{G_a(s)G_b(s)+1}$。

考虑电网阻抗对 PCC 电压的影响后，并网电流 $i_g(s)$ 为

$$i_g(s)=\frac{Z_o(s)}{Z_o(s)+Z_g(s)}G_s(s)i_2-\frac{u_g(s)}{Z_o(s)+Z_g(s)} \tag{8}$$

根据无源性理论，如果并网逆变器满足约束条件：①输出阻抗无右半平面极点；②输出阻抗的相位在[−90°，90°]之间，那么其将是稳定的。因此，若每台逆变器都是无源的，则其并联的等效系统也是无源的。由于电网阻抗相位$\angle Z_g$ 通常在[−90°, 90°]之间，多逆变器并网系统相角必定位于[−180°, 180°]之间，即整个系统是稳定的。

2　传统 PCC 电压前馈对无源性的影响

传统电网电压比例前馈具有结构简单、易于实现且能有效减小电网谐波扰动影响等优点，已成为逆变器并网中必要的控制策略[23-24]。含 PCC 电压前馈的三相 LCL 并网逆变器控制框图如图 3 所示。s 域控制框图如图 3(a)所示，其中反馈系数 G_f 为

$$G_f=1/K_{PWM} \tag{9}$$

此时，逆变器输出阻抗 $Z_1(s)$ 可以表示为

$$Z_1(s)=\frac{Z_o(s)Z_v(s)}{Z_o(s)+Z_v(s)} \tag{10}$$

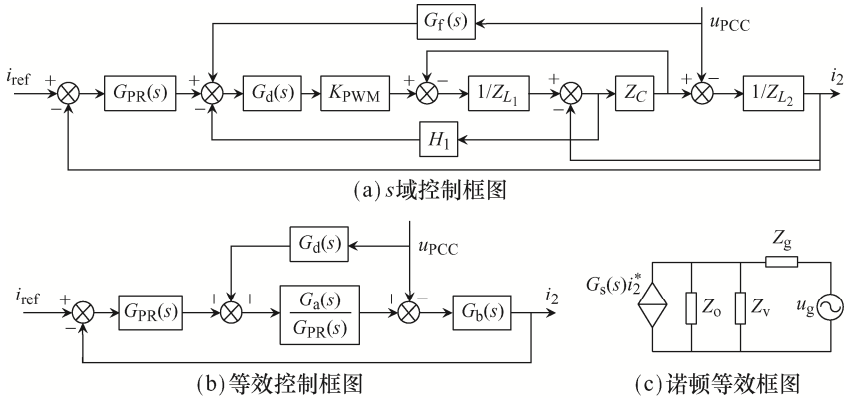


图 3 含 PCC 电压前馈的三相 LCL 并网逆变器控制框图

Fig. 3 Control block diagram of three-phase LCL grid-connected inverter with PCC voltage feedforword

式(10)中，$Z_v(s)$为电压前馈引入的等效虚拟阻抗，$Z_v(s)=-[L_1L_2Cs^3+K_{PWM}G_d(s)H_1L_2Cs^2+(L_1+L_2)s+K_{PWM}G_d(s)G_{PR}(s)]/[G_fK_{PWM}G_d(s)]$。

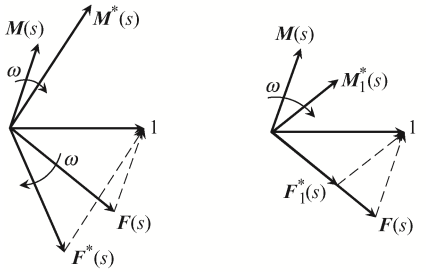
根据式(7)与式(10)，可以推导出采用比例前馈前、后逆变器输出阻抗之比 K_1 为

$$K_1(s)=\frac{L_1Cs^2+K_{PWM}G_d(s)H_1Cs+1}{L_1Cs^2+K_{PWM}G_d(s)(H_1Cs-G_f)+1}=1\Big/\left[1-\frac{K_{PWM}G_d(s)}{L_1Cs^2+K_{PWM}G_d(s)H_1Cs+1}G_f\right]=\frac{1}{M(s)}=\frac{1}{1-F(s)} \tag{11}$$

式中，$F(s)$为采用传统比例前馈引入的因式，在低频段可以简化为

$$F(s)\approx G_d(s) \tag{12}$$

此时 $\boldsymbol{M}(s)$矢量如图 4 所示，$K_1(s)$近似后的伯德图如图 5 所示。



(a) $\boldsymbol{M}(s)$矢量 (b) 改变前馈系数后$\boldsymbol{M}(s)$矢量

图 4 $\boldsymbol{M}(s)$矢量

Fig. 4 Vector of $\boldsymbol{M}(s)$

从图 5 可以看出，在低频段，单位前馈的引入大大增加了逆变器输出阻抗的幅值，有利于提高该频段的谐波抑制能力，但也引入了约 90° 的相位滞后，使逆变器并网系统相位裕度相应降低，影响系统稳定。从图 4(a)中，也可直观地得到传统单位前馈在低频段牺牲了逆变器的无源性而增强了逆变器的谐波抑制能力这一结论。

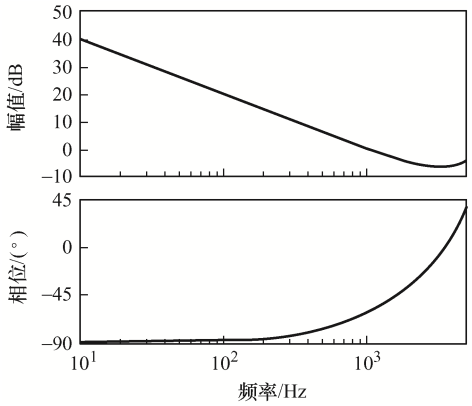


图 5 $K_1(s)$近似后伯德图

Fig. 5 Bode diagram of approximated $K_1(s)$

为了清晰阐明电压前馈对无源性的影响，图 6 给出了前馈加入前、后逆变器输出阻抗的伯德图。从图中可以明显看出，前馈在低频段大大降低了输

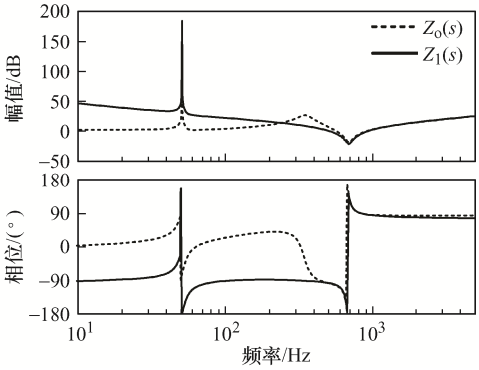


图 6 $Z_0(s)$与 $Z_1(s)$伯德图

Fig. 6 Bode diagram of $Z_0(s)$ and $Z_1(s)$

出阻抗的无源性，而在高频段对逆变器输出阻抗幅值相位影响不大。

3　改进的无源性阻抗重塑方法

3.1　低频段——改进 PCC 电压前馈控制

已有研究表明，加权前馈有利于提高逆变器的无源性和谐波抑制能力[25]。结合上述分析，为提高输出阻抗无源性和对谐波的抑制能力，需要在减小 $\angle \boldsymbol{M}(s)$的同时兼顾 $\boldsymbol{M}(s)$的幅值，即增加逆变器无源性的同时兼顾逆变器在低频段的谐波抑制能力。通过观察图 4(b)，最直观的方法是对 $\boldsymbol{F}(s)$进行改进。由于 $\boldsymbol{F}(s)$只有 PCC 电压前馈系数可以改变，因此将加权系数 n_0纳入前馈系数中，令前馈系数为

$$G_{\mathrm{f1}}=\frac{n_0}{K_{\mathrm{PWM}}} \tag{13}$$

用 G_{f1} 替换式(10)逆变器输出阻抗中的 G_{f}，此时在低频段采用改进控制策略前、后等效输出阻抗之比 K_2 为

$$K_2=\frac{1}{1-n_0G_{\mathrm{d}}(s)} \tag{14}$$

不同前馈系数逆变器输出阻抗的伯德图如图 7 所示。可以看出，随着加权系数的减小，逆变器输出阻抗在低频段的无源性增加，但对高频段影响不大。此外，输出阻抗低频幅值随着前馈系数的减小而减小，这意味着逆变器输出阻抗在低频段的无源性与其低频谐波抑制能力相矛盾。

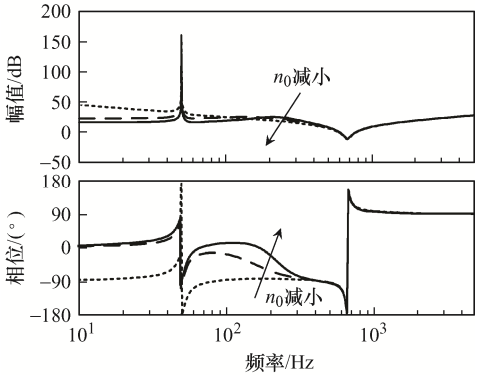


图 7　不同前馈系数逆变器输出阻抗伯德图

Fig. 7 Bode diagram of output impedance of inverters with different feedforward coefficients

根据上述分析可知，前馈控制方案可以提高低频谐波抑制能力，但会导致逆变器输出阻抗无源性减小，进一步增加系统相互作用的不稳定性风险。因此，需要提供一种折中的方案，来兼顾无源性及谐波抑制能力。

前馈系数改变时 $\boldsymbol{M}(s)$矢量如图 8 所示。根据图 8 可得，当合成矢量 $\boldsymbol{M}_2(s)$与 $\boldsymbol{F}(s)$垂直时幅值最小，并且与 $\boldsymbol{M}(s)$相比，$\angle \boldsymbol{M}(s)$也减小，即逆变器输出阻抗的无源性增加。当 n_0 持续减小，$\boldsymbol{M}_1(s)$与 $\boldsymbol{M}_2(s)$相比虽然相角减小，但 $\boldsymbol{M}(s)$幅值相应增加，即逆变器谐波抑制能力减弱。因此，$\boldsymbol{M}_2(s)$是兼顾无源性与谐波抑制能力的最佳选择。

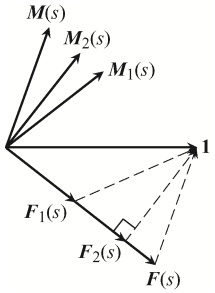


图 8　前馈系数改变时 $\boldsymbol{M}(s)$矢量

Fig. 8 Vector of $\boldsymbol{M}(s)$ with changes in feedforward coefficient

从图 8 中可以推导出 $\boldsymbol{M}_2(s)$的比例系数为

$$n_0=\cos(1.5\omega T_{\mathrm{s}}) \tag{15}$$

式中，ω 为角频率。此时系数与频率有关，为了更好地实现前馈函数，最好在控制中取为定值。

$\boldsymbol{F}(s)$与 $G_{\mathrm{d}}(s)$的伯德图如图 9 所示，可见，当频率低于分界频率 f_0 时，$\boldsymbol{F}(s)$与 $G_{\mathrm{d}}(s)$近似相同，取角频率为

$$\omega_1=2\pi\frac{f_0}{2}=\pi f_0 \tag{16}$$

取定 n_0 后的矢量如图 10 所示。由图 10 可见，当 $\omega=\omega_1$ 时，各频段上 $\boldsymbol{F}(s)$的理论幅值与实际幅值相差较小。

3.2　高频段——改进虚拟电感控制

由于 $\boldsymbol{F}(s)$在高频段与延时 $G_{\mathrm{d}}(s)$相差较大，低频段改进的控制方法不适用于高频段，输出阻抗在高频段仍可能与电网阻抗相交，为了保证整个系统

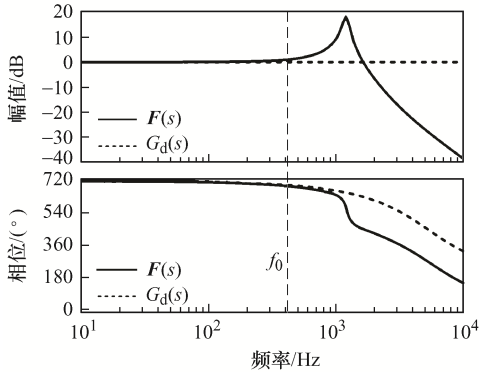


图 9 $F(s)$与 $G_d(s)$伯德图

Fig. 9 Bode diagram of $F(s)$ and $G_d(s)$

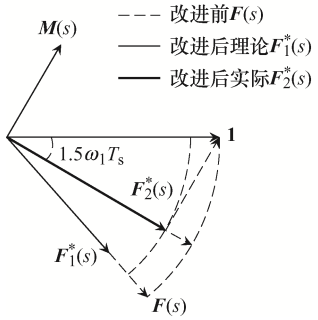


图 10 取定 n_0 后的矢量

Fig. 10 Vector with fixed n_0

的稳定，需要提高输出阻抗在高频段的无源性。因此，在低频段改进的基础上串联虚拟阻抗来提高高频段的无源性，其诺顿等效电路如图 11 所示。串联虚拟阻抗后逆变器控制框图如图 12 所示。

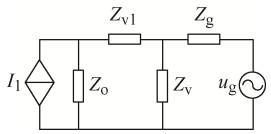


图 11 串联虚拟阻抗后并网逆变器诺顿等效模型

Fig. 11 Norton equivalent model of grid-connected inverter with series virtual impedance

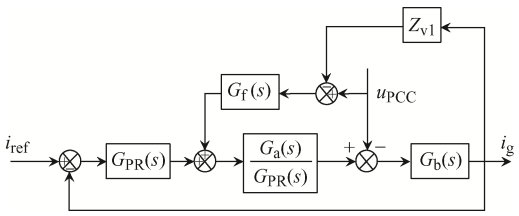


图 12 串联虚拟阻抗后逆变器控制框图

Fig. 12 Control block diagram of inverter with series virtual impedance

为了提升在高频段的无源性，需要将逆变器输出阻抗相位提升，虚拟电感是串联虚拟阻抗的最佳选择[26-27]。通过选取不同的虚拟阻抗，绘制逆变器输出阻抗伯德图，如图13 所示。由图13 可见，Z_{v1} 的增加会使低频段的无源性增强，高频段的无源性减弱。为了同时兼顾高低频段无源性，最终选择合适的虚拟阻抗为 0.5 mH。

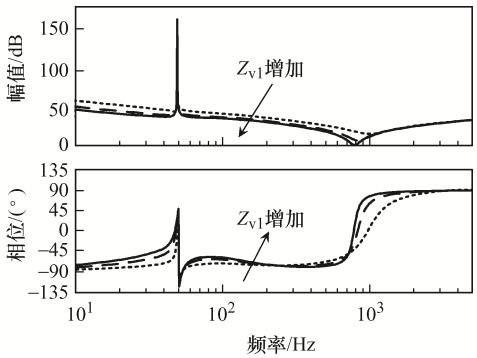


图 13 不同 Z_{v1} 情况下逆变器输出阻抗伯德图

Fig. 13 Bode diagram of output impedance of inverters with different values of Z_{v1}

将所提低、高频段控制策略应用于逆变器输出阻抗上，其伯德图如图 14 所示。与图 7 相比，逆变器输出阻抗相位保持在[−90°,90°]之间，较大地扩展了输出阻抗的无源性频段。

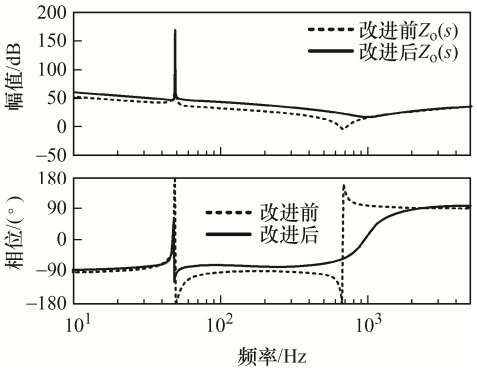


图 14 改进后逆变器输出阻抗 Bode 图

Fig. 14 Bode diagram of output impedance of improved inverter

根据上述分析，无源性阻抗重塑方法可总结如下。

(1)低频段改进前馈系数：①根据式(11)得到 $F(s)$表达式；②绘制 $F(s)$与 $G_d(s)$的伯德图，得到分界频率 f_0；③通过式(15)、式(16)计算出 n_0。

(2)高频段串联虚拟阻抗：在前馈系数改进的基础上，选定合适的虚拟阻抗参数，保证输出阻抗

的无源性。

4　仿真与实验验证

为了验证所提控制策略的有效性，本文使用 MATLAB/Simulink 搭建了 2 类三相 LCL 型并网逆变器，其参数见表 1。

表 1　不同类型逆变器参数

Tab. 1 Parameters of various kinds of inverters

参数	数值	
	Ⅰ型逆变器	Ⅱ型逆变器
PR 控制器比例系数 K_p	1.5	1.2
PR 控制器谐振系数 K_r	500	240
PR 控制器截止频率 ω_c/Hz	5	5
逆变器侧滤波电感 L_1/mH	5.0	2.5
电网侧滤波电感 L_2/mH	1.8	0.8
滤波电容 C/μF	45	30
电容电流反馈系数 H_1	2.1	1.3
采样频率 f/kHz	10	10
额定功率 P/kW	15	5

4.1　逆变器并网系统稳定性仿真研究

首先，对本文所提控制策略进行单逆变器仿真验证，电网侧电感变化情况下逆变器并网电流如图 15 所示。图 15(a)为在电网侧电感变化情况下，采用传统比例前馈控制时Ⅰ型逆变器并网电流的仿真结果。可以发现，并网电流在 L_g=2.0 mH 时是稳定的，当 0.3~0.5 s L_g 变为 3.0 mH 时，并网电流仍保持稳定；随着电网侧电感的减小，并网电流趋于不稳定，这是由于此时的电网侧电感与逆变器输出阻抗交截处相位差大于 180°。当采用所提控制策略后，逆变器输出电流如图 15(b)所示，可以看出电流在 2 种电网侧电感情况下均保持稳定。

图 16 为典型的多逆变器并网系统。在多逆变器并联系统中，每台逆变器从并网点看到的等效电网阻抗与实际电网阻抗不同。同时，逆变器的数量、参数的变化也会影响整个系统的稳定性。因此，为了验证所提控制策略在多逆变器并网系统中的适用性，本文对表 1 中 2 类不同参数的逆变器进行仿真验证。

令电网侧电感 L_g=2.0 mH，在 0.3 s 之前仅有Ⅰ型逆变器单独并网，在 0.3 s 后Ⅰ型和Ⅱ型逆变器同时并网。双逆变器并网下的总电网电流波形如图 17 所示。由图 17(a)可见，在Ⅱ型逆变器接入电网之前，Ⅰ型逆变器是稳定的，在接入Ⅱ型逆变器后，由于等效电网阻抗发生改变，并网逆变器系统变得不稳定。利用所提方案对 2 类逆变器进行改进，则在Ⅱ型逆变器接入后系统可保持稳定。

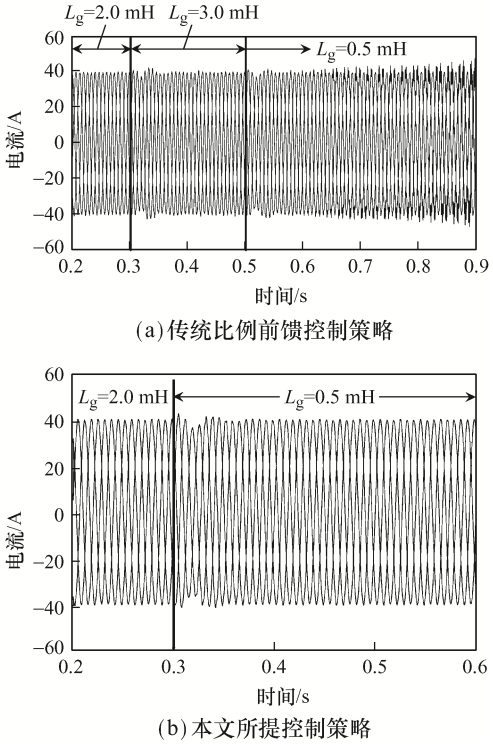


图 15　电网侧电感变化情况下逆变器并网电流

Fig. 15 Grid-connected current of inverter under changes in grid inductance

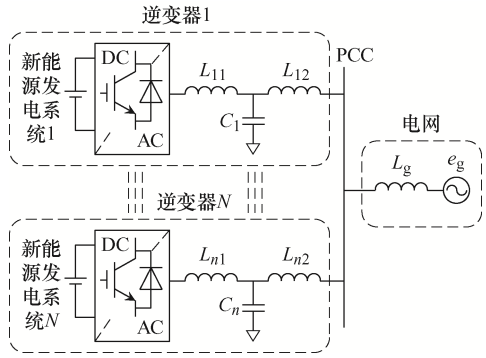


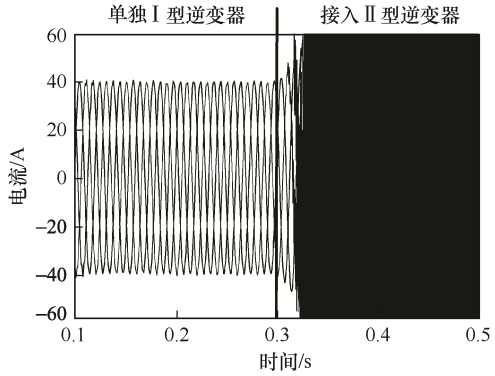
图 16　多逆变器并网系统

Fig. 16 Multi-inverter grid-connected system

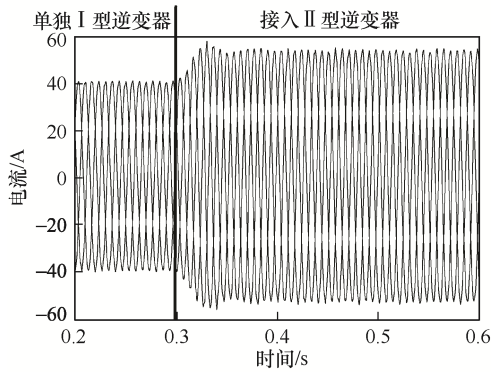
4.2　实验验证

为了进一步验证所提控制策略的正确性及在稳定性分析上的有效性，开展相应的实验研究，实

验装置如图 18 所示。



(a) 传统比例前馈控制策略



(b) 本文所提控制策略

图 17 双逆变器并网下的总电网电流波形

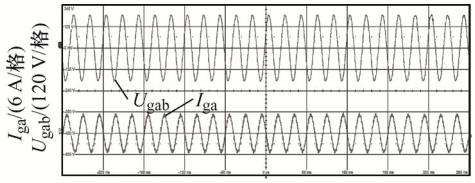
Fig. 17 Waveforms of total grid current under grid connection of dual inverters



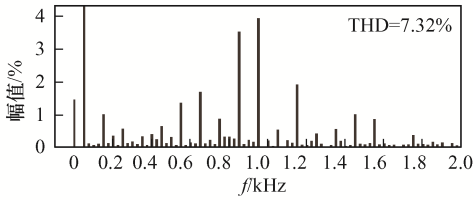
图 18 双逆变器并网实验装置

Fig. 18 Experimental setup for grid-connected dual inverters

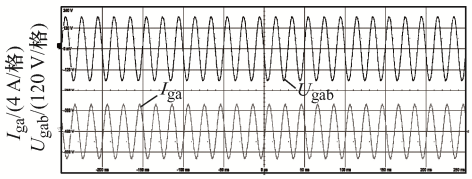
单逆变器并网系统实验波形如图 19 所示。图 19 中：I_{ga} 为并网 A 相电流；U_{gab} 为 AB 相线电压。可见，采用传统比例前馈控制时，逆变器输出电流总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)为 7.32%，采用所提控制策略时，THD 仅为 2.80%，符合并网要求。



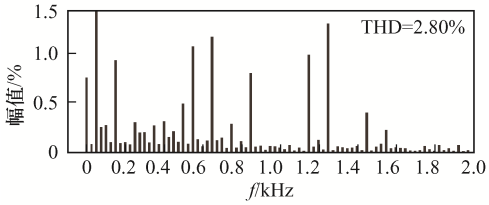
(a) 传统控制策略下的电流和电压



(b) 传统控制策略下的电流谐波



(c) 所提控制策略下的电流和电压

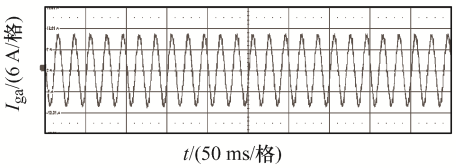


(d) 所提控制策略下的电流谐波

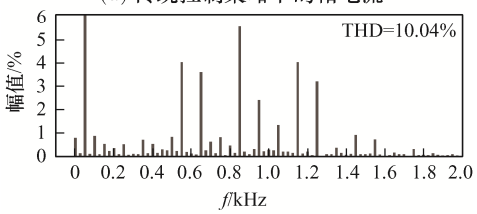
图 19 单逆变器并网系统实验波形

Fig. 19 Experimental waveforms of single-inverter grid-connected system

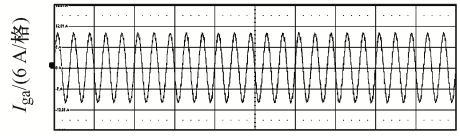
双逆变器并网下的总电网电流实验波形如图 20 所示，可见当Ⅱ型逆变器接入电网后，并网电流的畸变率进一步加大，当采用所提控制策略时，并网电流的 THD 降为 4.83%，符合并网要求。仿真及实验均可验证图 14 中理论分析的正



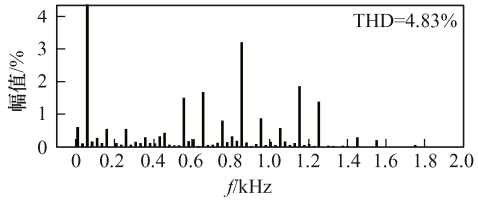
(a) 传统控制策略下的相电流



(b) 传统控制策略下的电流谐波



(c) 所提控制策略下的相电流



(d) 所提控制策略下的电流谐波

图 20　双逆变器并网下的总电网电流实验波形

Fig. 20 Experimental waveforms of total grid current under grid connection of dual inverters

确性，以及增强逆变器对等效电网阻抗变化的适应性。

5　结语

本文提出了 1 种提高多逆变器并联系统无源性的阻抗重塑策略。研究表明：电网阻抗、控制延时的存在及逆变器数量、参数的变化可能会导致整个系统失稳；常用于减少电网谐波扰动的传统比例前馈控制策略会影响并网系统的无源性。本文所提改进阻抗重塑策略，能够减少非无源区域，将逆变器输出阻抗相位保持在[−90°, 90°]之间，且当系统中的电网阻抗、逆变器数量及参数变化时，均能保证整个系统稳定运行。对于多逆变器并联系统无源性的研究，如何进一步提升高频段的相位裕度是下一步值得研究的问题。

参考文献：

[1] 吕鑫, 祁雨霏, 董馨阳, 等. 2020 年光伏及风电产业前景预测与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020, 22(2): 20-25.
Lü Xin, Qi Yufei, Dong Xinyang, et al. Outlook and prospect of the photovoltaic and wind power industry in 2020 [J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition), 2020, 22(2): 20-25. (in Chinese)

[2] 杨立永, 杜凯, 常奥宇, 等. L+LCL 型双频单相并网逆变器参数设计及控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 57-65.
Yang Liyong, Du Kai, Chang Aoyu, et al. Research on parameter design and control method of L+LCL dual frequency single phase grid-connected inverter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(8): 57-65. (in Chinese)

[3] 樊刚强, 杨勇. 基于 LCL 参数优化的新能源微电网并网逆变器控制方法[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 70-76.
Fan Gangqiang, Yang Yong. Control method for grid-connected inverter in new energy microgrid based on LCL parameter optimization [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 70-76. (in Chinese)

[4] 薛睿南, 李国进, 陈延明. 自适应陷波滤波器的并网逆变器相位超前补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(7): 124-132.
Xue Ruinan, Li Guojin, Chen Yanming. Phase lead compensation method of grid-connected inverter with adaptive Notch filter [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(7): 124-132. (in Chinese)

[5] 董宁, 何山, 王维庆, 等. 谐波电网下并网逆变器多次采样的改进功率控制[J]. 可再生能源, 2021, 39(6): 797-802.
Dong Ning, He Shan, Wang Weiqing, et al. Improved power control for multiple sampling of grid connected inverter under harmonic power grid [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(6): 797-802. (in Chinese)

[6] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.
Zhang Xing, Li Ming, Guo Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515. (in Chinese)

[7] 杨明, 杨杰, 赵铁英, 等. 弱电网下抑制谐振频率偏移的并网逆变器谐波谐振控制策略[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(8): 87-98.
Yang Ming, Yang Jie, Zhao Tieying, et al. Harmonic resonance control strategy of grid-connected inverter to suppress resonance frequency shift in weak grid [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(8): 87-98. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 宋国杰, 李国进, 杨浩, 等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下并网逆变器的自适应控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4455-4463.
Song Guojie, Li Guojin, Yang Hao, et al. Adaptive control of grid-connected inverter in microgrid based on Lyapunov function [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46 (12): 4455-4463. (in Chinese)

[10] 杨明, 赵月圆, 杨杰, 等. 高渗透率下一种提高 LCL 滤波并网逆变器鲁棒性的新型锁相环设计方案[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3938-3948.
Yang Ming, Zhao Yueyuan, Yang Jie, et al. A new phase-locked loop design scheme to improve the robustness of LCL filter grid-connected inverter under high permeability [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3938-3948. (in Chinese)

[11] Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. Modeling and control parameters design for grid-connected inverter system considering the effect of PLL and grid impedance [J]. IEEE Access, 2019, 8: 40474-40484.

[12] Alqatamin M, Latham J, Smith Z T, et al. Current control of a three-phase, grid-connected inverter in the presence of unknown grid parameters without a phase-locked loop [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3127-3136.

[13] 杨孟凌. 交流微网多尺度失稳机理与无源性增强控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Yang Mengling. Research on multi-timescale instability mechanism and passivity enhancement control method of AC microgrid [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)

[14] Harnefors L, Yepes A G, Vidal A, et al. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 702-710.

[15] Akhavan A, Golestan S, Vasquez J C, et al. Passivity enhancement of voltage-controlled inverters in grid-connected microgrids considering negative aspects of control delay and grid impedance variations [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 6637-6649.

[16] Yoon C, Bai Haofeng, Beres R N, et al. Harmonic stability assessment for multiparalleled, grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1388-1397.

[17] Harnefors L, Yepes A G, Vidal A, et al. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 702-710.

[18] Akhavan A, Vasquez J C, Guerrero J M. A simple method for passivity enhancement of current controlled grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7735-7741.

[19] 华铤, 林桦, 肖建杰, 等. 一种扩展 LCL 型并网逆变器有效阻尼区的超前补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 197-203.
Hua Ting, Lin Hua, Xiao Jianjie, et al. Lead compensation method for extending valid damping region of LCL-type grid-connected inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 197-203. (in Chinese)

[20] 王林, 孙鹏菊, 薛统宇, 等. 一种提高 LCL 型并网逆变器电流控制性能的延时补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6320-6330.
Wang Lin, Sun Pengju, Xue Tongyu, et al. A delay compensation method to improve the current control performance of the LCL-type grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6320-6330. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 刘春喜, 高姬. 数字控制延时对逆变系统性能的影响及其 Pade 近似方法[C]//中国电工技术学会学术年

会——新能源发电技术论坛论文集. 威海, 中国: 中国电工技术学会, 2013: 374-380.

Liu Chunxi, Gao Ji. Effect of digital control delay on inverter system and method of its Pade approximation [C]// Conference of China Electrotechnical Society: New Energy Generation Technology Forum Proceedings. Weihai, China: China Electrotechnical Society, 2013: 374-380. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 杨明, 杨倬, 李玉龙, 等. 弱电网下基于电网电压前馈的并网逆变器阻抗重塑控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2553-2566.

Yang Ming, Yang Zhuo, Li Yulong, et al. Impedance Remodeling Control Strategy of Grid-Connected Inverter Based on Feedforward Voltage under Weak Grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2553-2566. (in Chinese)

[25] Wang Cheng, Wang Xuehua, He Yuying, et al. A passivity-based weighted proportional-derivative feedforward scheme for grid-connected inverters with enhanced harmonic rejection ability [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 11(4): 3656-3668.

[26] 杨树德, 李旺, 张新闻, 等. 一种提高变流器弱电网适应能力的虚拟阻抗控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 158-166.

Yang Shude, Li Wang, Zhang Xinxin, et al. Virtual impedance control strategy for improving the adaptability of converter to weak grid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 158-166. (in Chinese)

[27] Yang Dongsheng, Ruan Xinbo, Wu Heng. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.



徐海亮

作者简介：

徐海亮(1985—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电及微电网。E-mail：xuhl@upc.edu.cn。

张伟杰(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：多逆变器并联系统稳定性分析。E-mail：wdzwjie@163.com。

林鸿彬(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：多逆变器并联系统稳定性分析。E-mail：lin_hongbin@126.com。

(责任编辑：陈国珍)



来源：中国文明网