DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.137 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于自适应电压前馈的并网逆变器弱网致稳控制

张 琳[1]，游龙翔[2]，宋美艺[1]，曹 苗[1]，严 薇[1]，张 欣[2](中国电源学会会员)
(1.国网陕西省电力有限公司经济技术研究院，西安 710075；2.浙江大学电气工程学院，杭州 310027)

摘要：随着新能源渗透率的不断提高，并网逆变器与弱电网之间的阻抗交互作用易诱发小信号振荡失稳问题。针对这一问题，首先分析了现有电压前馈阻抗重塑策略的局限性，接着提出一种自适应电压前馈阻抗重塑策略。该策略利用模拟退火-粒子群混合算法对不同输出功率和电网阻抗下的样本工况分别进行前馈通路参数的离线优化设计，进而利用多项式拟合来覆盖连续全工况范围。通过将拟合关系式部署于逆变器中，以根据实时输出功率和电网阻抗自适应调节前馈通路参数。所提自适应策略可保证并网逆变器在不同输出功率和电网阻抗情形下均具备较优的稳定裕度，并在一定程度上兼顾系统的动态性能。最后，通过OPAL-RT半实物实验平台开展实验，验证了所提策略的有效性。

关键词：并网逆变器；弱电网；稳定性；阻抗重塑；自适应控制策略

Weak Grid Stabilization Control of Grid-connected Inverter Based on Adaptive Voltage Feedforward

ZHANG Lin[1], YOU Longxiang[2], SONG Meiyi[1], CAO Miao[1], YAN Wei[1], ZHANG Xin[2], *Member*, *CPSS*
(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the continuous increase in new energy penetration, the impedance interaction between a grid-connected inverter (GCI) and a weak grid is easy to induce small-signal oscillation instability. To solve this problem, the limitations of the existing voltage feedforward impedance reshaping strategy are analyzed in this paper at first. Then, an adaptive voltage feedforward impedance reshaping strategy is proposed. This strategy utilizes simulated anneal-particle swarm optimization algorithm to optimize the feedforward path parameters off-line under sample conditions of different values of output power and grid impedance, and polynomial fitting is used to cover the continuous full operating range. By deploying the fitting relationship in the inverter, the feedforward path parameters can be adjusted adaptively according to real-time power and grid impedance. The proposed adaptive strategy can ensure a better stability margin of GCI under conditions of different values of output power and grid impedance, and the dynamic performance of the system is considered to some degree. Finally, experiments were carried out on an OPAL-RT semi-physical experimental platform to verify the effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: Grid-connected inverter (GCI); weak grid; stability; impedance reshaping; adaptive control strategy

在如今能源危机和环境恶化的背景下，光伏、风电等新型清洁能源的发展为人类社会的可持续发展提供了新的解决方案[1]。并网逆变器GCI(grid-connected inverter)作为新能源并网的重要接口设备，在光伏、风电等新能源系统中的应用越来越广泛[2]。然而，可再生能源往往集中在偏远地区，并网逆变器与电网之间的输电距离较长，这导致了电网侧存在无法忽略的阻抗，使其呈现出弱(电)网的特性。这种弱电网环境极易诱发并网逆变器的振荡失稳，给逆变器的稳定运行带来了严峻的

收稿日期：2024-07-10；**修回日期**：2024-08-21；**录用日期**：2024-08-23；**网络首发日期**：2024-10-11

挑战[3]。

现有研究广泛采用基于阻抗的分析方法来研究并网逆变器与弱电网之间的交互稳定性，通过分析电网侧输入阻抗与逆变器输出阻抗的比值是否满足(广义)奈奎斯特判据，可判断并网逆变器系统是否稳定[4]。对于跟网型并网逆变器而言，其锁相环在低频段引入的负阻特性是小信号失稳的主导因素之一[5-6]。学者们针对此类失稳问题的治理展开了诸多方面的研究。从控制器参数调节角度，文献[7-8]指出通过减小锁相环的带宽可以提高并网逆变器在弱网下的稳定性，但过低的锁相环带宽会严重影响控制性能。从锁相环结构优化角度，文献[9]提出利用二阶振荡环节代替传统锁相环，文献[10]提出了一种基于降阶广义积分和二阶广义积分的复合广义积分锁相环，实现并网逆变器在高电网阻抗下的稳定运行。从添加控制回路重塑阻抗角度，文献[11]基于无源性理论，通过加入并网点PCC(point of common coupling)电压前馈通路重塑逆变器输出阻抗，将其相位保持在[−90°,90°]之间，避免了与电网阻抗的不匹配问题；文献[12]提出一种基于双滤波器的延迟补偿方法，在原有电流调节器上并入一条滤波通路，实现逆变器输出阻抗的无源化，但实现精确的阻抗重塑往往需要涉及复杂的理论推导。

上述关于并网逆变器稳定性分析与治理的研究旨在保障并网逆变器在弱电网甚至极弱电网下的稳定运行，所设计的并网逆变器系统对于电网强度波动具有极强的鲁棒性，这在弱电网的极端场景下是可行的。然而，并网逆变器的功率和电网侧阻抗均可能随时间变化，若仅为保障极端弱网场景下的稳定裕度，将会大大牺牲并网逆变器系统的动态性能。针对该问题，文献[13]采用有源阻尼器来模拟 PCC 的并联虚拟电阻，通过 PCC 的电压谐波含量来判断当前系统稳定性，并自适应调节虚拟电阻来致稳，但额外的有源阻尼电路增加了系统成本；文献[14]提出了根据电网的强弱分别采用电流源型和电压源型控制策略的分段式自适应控制策略，并加入了锁相环带宽的自适应调节，但 2 套控制策略的切换增加了控制系统的复杂度，且锁相环带宽的减小不利于锁相环节的动态性能；文献[15]提出了一种基于比例权重的控制环参数自适应调整控制方法，能够保证逆变器在弱电网范围内具有 30° 以上的充足稳定裕度，但其未考虑逆变器输出功率变化的场景。

综上所述，现有针对并网逆变器在不同工作场景下的稳定性自适应控制存在较多局限性。针对该问题，本文提出一种自适应电压前馈阻抗重塑策略来改善系统稳定性，通过在前馈通路中加入自适应带通滤波器 BPF(band-pass filter)，以最小化前馈作用范围，实现仅针对失稳风险频段附近的阻抗精确重塑。采用模拟退火-粒子群优化 SA-PSO(simulated annealing-particle swarm optimization)混合算法对不同输出功率和电网阻抗的样本工况分别进行前馈通路参数的离线优化设计，进而利用多项式拟合来覆盖连续全工况范围。通过将拟合关系式部署于逆变器中，可实现根据实时输出功率和电网阻抗自适应调节前馈通路参数。所提控制策略可保证逆变器系统在不同输出功率和电网阻抗下始终保持较优的并网稳定裕度，实现稳定性与自身动态性能的平衡，提高并网逆变器对不同弱网环境的适应能力。

首先，本文建立并网逆变器的网侧端口阻抗模型；其次，分析并网逆变器系统在弱网情形下的稳定性问题，并指出当前虚拟阻抗策略的局限性；然后，介绍本文所提自适应控制策略，构建典型工况并开展稳定性分析；最后，搭建基于 OPAL-RT 的实验平台，对所提并网逆变器自适应虚拟阻抗策略开展相关实验验证。

1 并网逆变器端口阻抗建模

典型的 L 型三相并网逆变器结构和控制策略如图1所示。图1中：V_{dc}为直流侧母线电压；L_{f}和R_L分别为逆变器输出滤波电感及其寄生电阻；L_{g}为电网(侧)阻抗；v_{gabc}为 a、b、c 三相电网电压；v_{abc}为 PCC 的三相电压；i_{abc}为三相入网电流；K_{pwm}为脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)的调制

系数；ω_0为电网基波角频率；$H_i(s)$为电流控制器；下标 d、q 分别表示 d 轴、q 轴的信号。

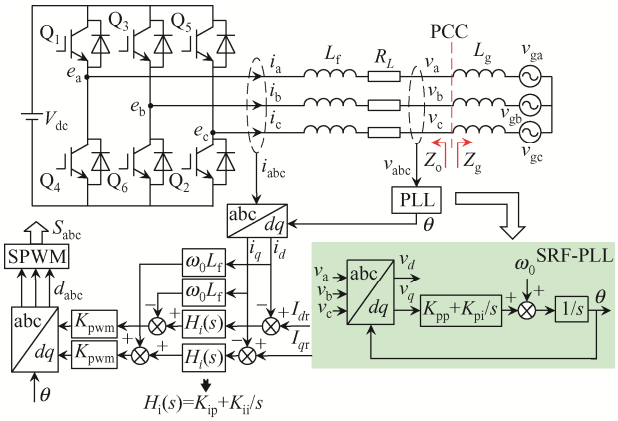


图 1　三相并网逆变器系统结构

Fig. 1 Structure of three-phase GCI system

基于文献[16]的小信号建模过程，向系统中注入小信号扰动并进行线性化处理，得到并网逆变器在 dq 坐标系下的小信号模型，如图 2 所示。

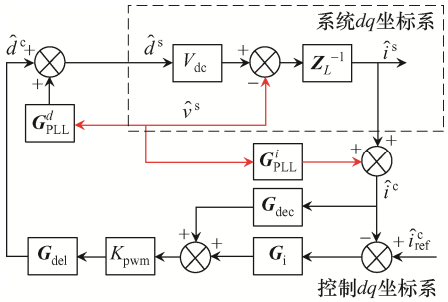


图 2　考虑 PLL 动态的并网逆变器系统的小信号模型

Fig. 2 Small-signal model of GCI system considering PLL dynamics

图 2 中：上标 ^ 表示小信号；上标 s 表示坐标系中实际系统的信号；上标 c 表示坐标系中控制器系统的信号；$\boldsymbol{G}_i$为电流调节器矩阵；$\boldsymbol{G}_{dec}$为解耦矩阵；$\boldsymbol{Z}_L$为滤波电感阻抗矩阵；$\boldsymbol{G}_{del}$为控制延时矩阵。考虑到数字控制的特点，本文在建模过程中加入了一拍控制延时(开关周期为 $\boldsymbol{T}_s$)并用其一阶Pade近似表示[17-18]。各矩阵表达式分别为

$$\boldsymbol{G}_i(s)=\begin{bmatrix}H_i(s) & 0\\ 0 & H_i(s)\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{G}_{dec}(s)=\begin{bmatrix}0 & -\omega_0 L_f\\ \omega_0 L_f & 0\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Z}_L(s)=\begin{bmatrix}sL_f+R_L & -\omega_0 L_f\\ \omega_0 L_f & sL_f+R_L\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{G}_{del}(s)=\begin{bmatrix}G_d(s) & 0\\ 0 & G_d(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}e^{-T_s s} & 0\\ 0 & e^{-T_s s}\end{bmatrix}\approx \begin{bmatrix}\dfrac{1-0.5sT_s}{1+0.5sT_s} & 0\\ 0 & \dfrac{1-0.5sT_s}{1+0.5sT_s}\end{bmatrix} \tag{4}$$

由于锁相环的引入，实际系统坐标系和控制器系统坐标系之间存在相角差，可建立占空比和电流在不同坐标系中的转换关系为

$$\begin{bmatrix}\hat{d}_d^s\\ \hat{d}_q^s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -D_q^s G_{PLL}\\ 0 & D_d^s G_{PLL}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{v}_d^s\\ \hat{v}_q^s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\hat{d}_d^c\\ \hat{d}_q^c\end{bmatrix}=\boldsymbol{G}_{PLL}^d\begin{bmatrix}\hat{v}_d^s\\ \hat{v}_q^s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\hat{d}_d^c\\ \hat{d}_q^c\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix}\hat{i}_d^c\\ \hat{i}_q^c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & I_q^s G_{PLL}\\ 0 & -I_d^s G_{PLL}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{v}_d^s\\ \hat{v}_q^s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\hat{i}_d^s\\ \hat{i}_q^s\end{bmatrix}=\boldsymbol{G}_{PLL}^i\begin{bmatrix}\hat{v}_d^s\\ \hat{v}_q^s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\hat{i}_d^s\\ \hat{i}_q^s\end{bmatrix} \tag{6}$$

根据图 2，可建立并网逆变器的 dq 域网侧端口阻抗模型为

$$Z_o(s)=-\frac{\hat{v}^s}{\hat{i}^s}=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}_{PLL}^d V_{dc}-K_{pwm}V_{dc}\boldsymbol{G}_{del}(\boldsymbol{G}_{dec}-\boldsymbol{G}_i)\boldsymbol{G}_{PLL}^i]^{-1}[\boldsymbol{Z}_L-K_{pwm}V_{dc}\boldsymbol{G}_{del}(\boldsymbol{G}_{dec}-\boldsymbol{G}_i)] \tag{7}$$

式中：Z_o为网侧端口阻抗；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

图 3 展示了并网逆变器的端口阻抗 Bode 图，其相关参数见表 1。由于逆变器采用了 dq 轴解耦的控制策略，并且已有研究表明，并网逆变器在弱电网中的失稳问题主要是由锁相环在 q-q 轴中引入的负电阻特性所引起的[5-6]，因此，为简化分析，

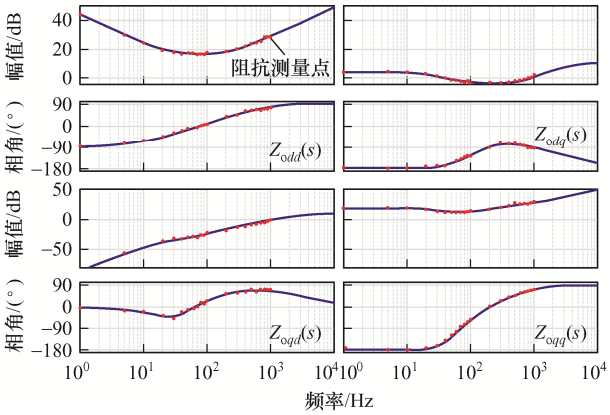


图 3　并网逆变器输出阻抗

Fig. 3 Output impedance of GCI

表 1 并网逆变器系统参数

Tab. 1 Parameters of GCI system

参数	数值
直流母线电压 V_{dc}/V	800
电网电压幅值 V_g/V	311
基波频率 f_0/Hz	50
开关周期 T_s/s	1/5 000
滤波电感 L_f/mH	5
寄生电阻 R_L/mΩ	1
有功参考电流 I_{dr}/A	30
无功参考电流 I_{qr}/A	0
锁相环比例系数 K_{pp}	1.4
锁相环积分系数 K_{pi}	317
电流环比例系数 K_{ip}	7
电流环积分系数 K_{ii}	1 000
PWM 调制系数 K_{pwm}	1/800
有功功率 P/kW	14
无功功率 Q/kvar	0

本文后续仅利用 q-q 轴阻抗开展稳定性分析与自适应控制设计。

2 弱网稳定性与现有阻抗重塑策略分析

2.1 弱网稳定性分析

利用阻抗分析法分析并网逆变器系统的弱网稳定性，易得并网逆变器与电网级联系统的等效电路模型，如图 4 所示。根据阻抗比 T_m 可判断系统级联稳定性[4]。绘制额定功率下不同短路比 SCR(short circuit ratio)的 q-q 轴阻抗比 $Z_{gqq}(s)/Z_{oqq}(s)$ 的 Nyquist 曲线，如图 5 所示。

由图 5 可以看出，当初步进入弱电网(SCR=3.00)

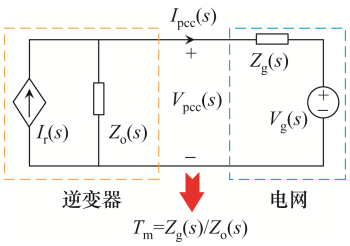


图 4 并网逆变器系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of GCI system

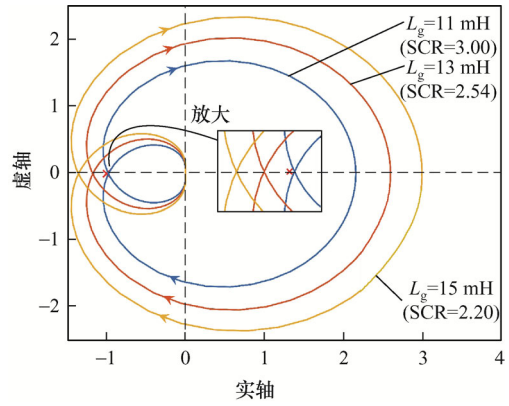


图 5 不同 SCR 下的阻抗比 Nyquist 曲线

Fig. 5 Nyquist curves of impedance ratio under different SCRs

时，阻抗比的 Nyquist 曲线不包围(−1, j0)点，这表明系统虽稳定，但已十分接近临界失稳情形。随着电网进一步变弱，其 Nyquist 曲线逐渐包围(−1, j0)点，系统进入不稳定状态。分析结果表明，随着电网强度的变弱，并网逆变器的稳定性降低，不能满足弱网条件下的稳定运行需要。

2.2 现有阻抗重塑策略分析

由上述分析可知，传统控制下的并网逆变器对弱电网的适应能力较低。由于并网逆变器系统的失稳主要是由于逆变器输出阻抗 $Z_{oqq}(s)$和电网输入阻抗 $Z_{gqq}(s)$不匹配所致，即输出阻抗和输入阻抗存在交截频段，且交截频段的相位差大于180°。因此，现有研究常通过引入 q 轴 PCC 电压前馈通路来重塑逆变器 q-q 轴输出阻抗[11]，如图 6 所示。本文以常见的 q 轴比例电压前馈和二阶带通滤波器电压前馈为例，对加入电压前馈环节前后的系统稳定性展开分析。

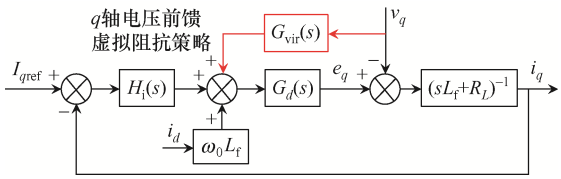
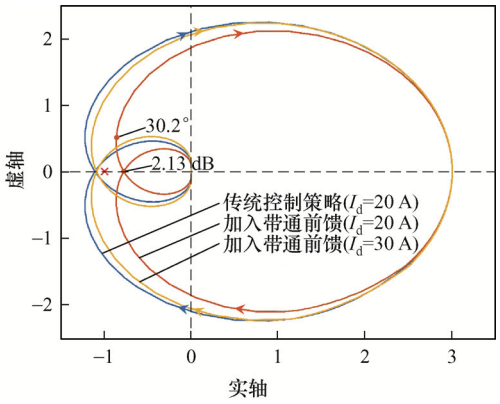


图 6 基于 q 轴电压前馈的阻抗重塑策略

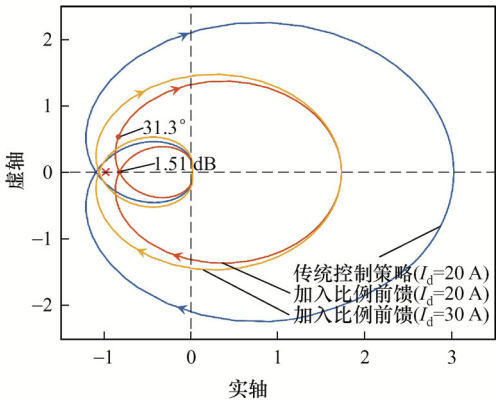
Fig. 6 Impedance reshaping strategy based on q-axis voltage feedforward

图 7 分别展示了采用二阶带通前馈和比例前馈策略重塑逆变器输出阻抗前后的阻抗比 Nyquist

曲线。由图 7 分析易知，当有功输出电流 I_d=20 A 时，采用传统控制策略的并网逆变器系统阻抗比 Nyquist 曲线包围(−1, j0)点，系统失稳，此时通过二阶带通前馈和比例前馈均可对逆变器输出阻抗进行有效重塑使得系统重新致稳。同时为了不过多牺牲原有系统控制性能，设计前馈通路使系统的级联相位裕度保持在 30° 附近。然而，当 I_d 增加至 30 A 时，2 种前馈策略的阻抗比曲线均包围(−1, j0)点，系统再次失稳，这表明针对特定工况下的阻抗重塑设计可能随着系统工况逐渐恶化而失效。此外，若按照 I_d=30 A 的场景进行前馈通路的设计，则对 I_d=20 A 时的较轻工况而言冗余度过大，不利于充分释放系统控制性能。因此，固定的阻抗重塑策略难以适应变化的并网逆变器工作场景，电网阻抗的变化亦是同理。



(a) 二阶带通前馈



(b) 比例前馈

图 7　加入电压前馈前后的阻抗比 Nyquist 曲线

Fig. 7 Nyquist curves of impedance ratio before and after adding voltage feedforward

3　基于 SA-PSO 算法的自适应阻抗重塑策略

3.1　自适应阻抗重塑策略概述

采用第 2 节虚拟阻抗重塑策略可改善并网逆变器在弱网情形下的稳定性，但这需要对不同工作场景下的前馈通路参数进行合理设计。由于并网逆变器系统在运行过程中的输出功率和电网阻抗均可能在一定范围内变化，为了保证在宽工况范围内均具备合理的稳定裕度和动态性能，本文以 q 轴 PCC 电压前馈为基础，提出一种基于 SA-PSO 混合算法的在线自适应阻抗重塑策略，以保证系统在宽范围工况变化时均具备较优的稳定裕度，其实现方案如图 8 所示。图 8 中：K_v 为前馈系数；K 为通带宽度；$\omega_c=2\pi f_c$ 为带通滤波器中心角频率。

首先，需要根据实际环境确定该系统可能的工作范围，在范围内生成网格化样本工况点，并基于阻抗模型交截频率初步确定带通滤波器中心频率 $f_{c,init}$；其次，针对各样本点分别采用 SA-PSO 混合算法进行当前工况下的前馈通路参数离线设计；接着，利用多项式拟合获得由离散样本点到连续全工况范围内的函数关系式；最后，通过将函数关系式部署在逆变器系统中，系统即可根据所感知的实时功率和电网阻抗对前馈通路参数进行自适应调节。在前馈通路中引入带通滤波器 G_{BPF} 使其具有一定的“选频”特性，可精确作用于阻抗交截的风险频段，以尽可能减小对原系统的影响。值得注意的是，采用不同滤波器结构的并网逆变器在低频段的负阻特性是相同的，本文所提针对特定频段的自适应阻抗重塑策略可有效治理因负阻导致的阻抗不匹配失稳问题，因此该策略对不同滤波器结构的并网逆变器具备较强的普适性。

3.2　基于 SA-PSO 的样本离线训练

模拟退火 SA(simulated annealing)算法是一种基于金属退火机制的全局优化方法，能够以一定概率接受劣点，从而具有跳出局部最优解的能力[19]，但优化效果与计算时间存在矛盾，收敛时间往往过长。相反，粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)

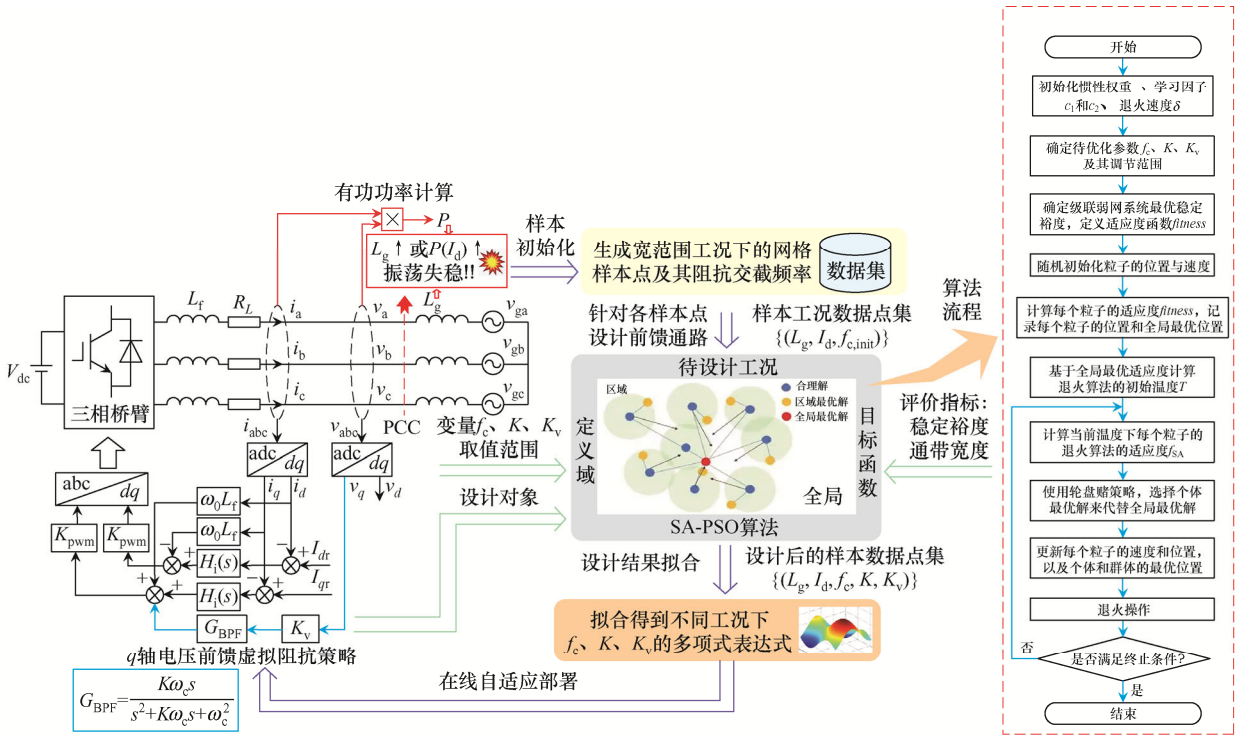


图 8 自适应虚拟阻抗重塑策略设计方案

Fig. 8 Design scheme for adaptive virtual impedance reshaping strategy

算法简单、收敛速度快，但容易陷入局部最优值，后期收敛速度较慢。因此，通过将模拟退火过程引入粒子群算法，用模拟退火算法中接受劣解的思想来优化粒子群全局最优位置的选取及速度更新过程，可帮助跳出传统粒子群算法寻找到的局部最优位置，提升其全局搜索能力。为了提高并网逆变器对不同工况的适应性，本文以解析模型和阻抗分析法为理论基础计算系统级联稳定裕度，进而结合稳定裕度与前馈幅度定义多目标适应度函数，采用基于数据驱动的SA-PSO启发式算法对各类型工况下的前馈通路相关参数分别进行优化设计，以保证系统在不同输出功率及电网阻抗下均具备较优的稳定裕度。其算法流程如图 8 所示[20-22]。

下面对SA-PSO算法在本文应用场景下的一些关键点进行说明。

(1)初始化样本。本文以图 1 和表 1 所示并网逆变器为例，确定输出功率变化范围为额定功率(I_d=20~40 A)的 67%~133%，电网阻抗变化范围为 10~16 mH，即 SCR=4.95~1.55，设计所选工作范围内的自适应控制策略。在所选工况范围内，等间隔生成网格化样本点 176 个，并绘制各样本点逆变器及电网的阻抗 Bode 图，获取的阻抗幅值交截频率作为该样本点的初始带通滤波器中心频率$f_{c,init}$。

(2)获取变量f_c、K、K_v的取值范围。考虑到理论模型及优化算法的误差，带通滤波器中心频率应被允许在阻抗交截频率 $f_{c,init}$ 的基础上存在一定偏移。因此，本文定义各样本点的中心频率f_c取值范围为[$f_{c,init}$ −2,$f_{c,init}$ +2]。此外，根据前馈通路设计经验，本文将通带宽度 K 和前馈系数 K_v 的取值范围分别定义为[0, 15]和[0, 2]。实际中可根据不同系统工况和期望裕度进行合理设置，如在电网阻抗和功率波动较大场景时，可进一步扩宽 K 和 K_v 的取值范围以覆盖宽范围工况；同理，在期望的级联稳定裕度较大时，需要进一步扩宽 K 和 K_v 的取值范围以增强阻抗重塑的力度。通常地，可由设计人员分别选取最轻工况和最恶劣工况进行人工设计测算，以获取各参数的大致取值范围。

(3)确定初始温度 T。初始温度 T 决定了算法接受较差解的可能性，通常可以在开始时设置较高的初始温度。T 的选取通常与初始适应度有关，如果

当前适应度函数较大，说明当前种群距离全局最优解较远，需要尽可能广泛地搜寻，即需要较高的温度来增加搜索的随机性。本文的初始温度 T 确定公式为

$$T=-\frac{fitness(P_{\mathrm{pd,init}})}{\lg 0.9} \tag{8}$$

式中：$P_{\mathrm{pd,init}}$ 为初始粒子群的全局最优位置；$fitness(P_{\mathrm{pd,init}})$ 为其对应的适应度函数。

(4)评价指标。考虑到过大的级联稳定裕度是建立在牺牲系统动态性能基础上的，为了综合考虑级联稳定性和系统的动态性能，定义 2 dB 和 30° 分别为弱网级联系统的期望级联幅值裕度和相位裕度。此外，为了减小对原系统的影响，K 和 K_{v} 被认为是越小越好的。综上所述，可定义目标函数为

$$\begin{aligned} fitness=&\alpha\left|G_{\mathrm{m,c}}-2\right|+\beta\left|P_{\mathrm{m,c}}-30\right|+\\ &\gamma|K|+\chi\left|K_{\mathrm{v}}\right| \end{aligned} \tag{9}$$

式中：$G_{\mathrm{m,c}}$ 和 $P_{\mathrm{m,c}}$ 分别为并网逆变器系统的级联幅值裕度和相位裕度；α、β、γ、χ 为权重系数。

由于 $G_{\mathrm{m,c}}$、$P_{\mathrm{m,c}}$、K 和 K_{v} 对目标函数的影响程度不同，需针对这四者的权重系数进行合理选取。此外，也可根据实际需要，赋予某项更大的权重以优先保障该指标。通过分析各项指标的数量级易知，$P_{\mathrm{m,c}}$ 和 K 对目标函数的影响程度较大，$G_{\mathrm{m,c}}$ 和 K_{v} 次之，需针对性地设置不同的权重系数来平衡 4 个参数的影响。此外，考虑到弱网失稳的主要原因往往是阻抗交截频段的相位差过大，且幅值裕度和相位裕度的变化具有一致性，因此本文拟给予相位裕度更大的权重。因此，本文的权重系数分别设计为：α=6，β=4，γ=3，χ=6。

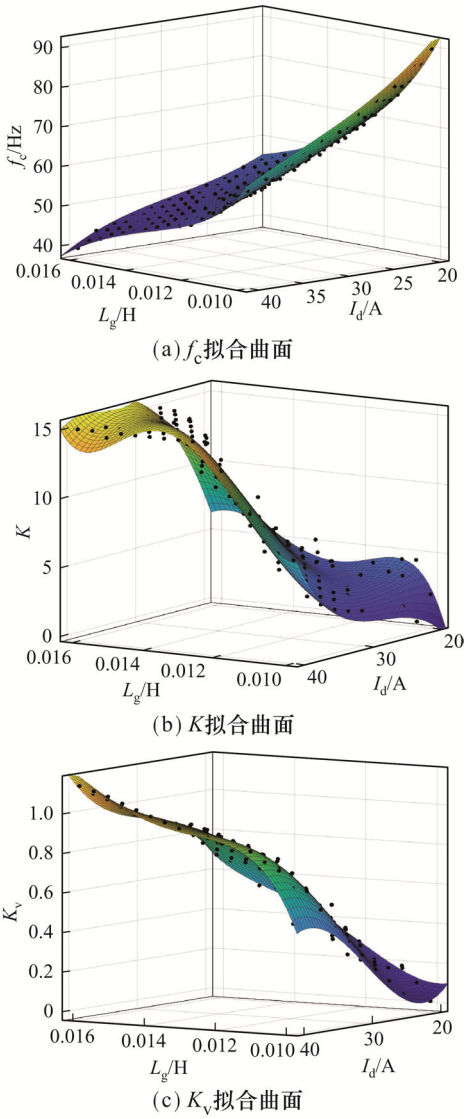
对各样本工况点采用SA-PSO算法进行前馈通路的优化设计，可得到综合考虑稳定性与动态性能约束的设计结果数据样本点集$\{(L_{\mathrm{g}}, I_{\mathrm{d}}, f_{\mathrm{c}}, K, K_{\mathrm{v}})\}$，进而可对所得离散样本点进行数据拟合实现连续工况下的覆盖。

3.3 基于多项式拟合的全工况覆盖

为了实现由离散样本点到连续全工况的覆盖，需进一步对所训练样本数据进行多项式拟合。首先，确定自变量为电网阻抗L_{g}和有功电流I_{d}，因变量分别为中心频率f_{c}、通带宽度 K 和前馈系数 K_{v}；接着，选取合适的自变量幂次数，分别建立f_{c}、K、K_{v}与 I_{d}、L_{g}的多项式映射关系。以中心频率f_{c}为例，在拟合过程中，L_{g}和 I_{d}的最高次幂分别取 5 次和 3 次，拟合多项式为

$$\begin{aligned} f_{\mathrm{c}}=f(L_{\mathrm{g}},I_{\mathrm{d}})=&p_{00}+p_{10}L_{\mathrm{g}}+p_{01}I_{\mathrm{d}}+\\ &p_{20}L_{\mathrm{g}}^2+p_{11}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{d}}+p_{02}I_{\mathrm{d}}^2+p_{30}L_{\mathrm{g}}^3+\\ &p_{21}L_{\mathrm{g}}^2I_{\mathrm{d}}+p_{12}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{d}}^2+p_{03}I_{\mathrm{d}}^3+p_{40}L_{\mathrm{g}}^4+\\ &p_{31}L_{\mathrm{g}}^3I_{\mathrm{d}}+p_{22}L_{\mathrm{g}}^2I_{\mathrm{d}}^2+p_{13}L_{\mathrm{g}}I_{\mathrm{d}}^3+p_{50}L_{\mathrm{g}}^5+\\ &p_{41}L_{\mathrm{g}}^4I_{\mathrm{d}}+p_{32}L_{\mathrm{g}}^3I_{\mathrm{d}}^2+p_{23}L_{\mathrm{g}}^2I_{\mathrm{d}}^3 \end{aligned} \tag{10}$$

以本文对象为例，图 9 分别展示了f_{c}、K 和 K_{v}



(a) f_{c}拟合曲面

(b) K拟合曲面

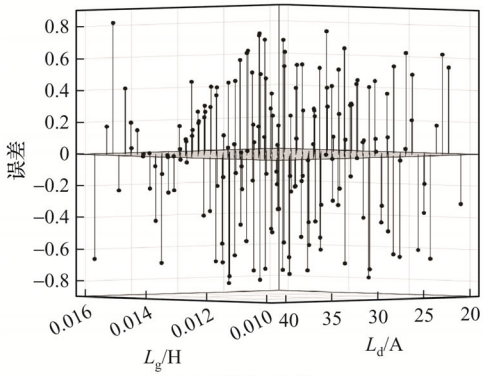
(c) K_{v}拟合曲面

图 9　前馈通路参数拟合曲面

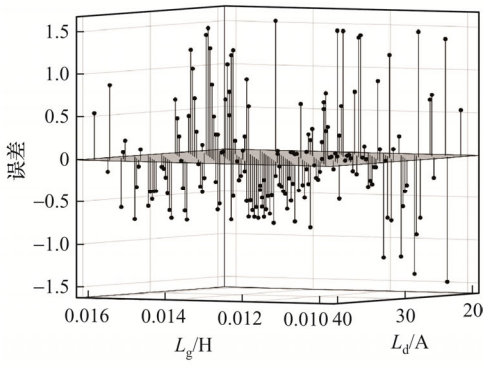
Fig. 9 Fitting surface of feedforward path parameters

的拟合曲面。由理论分析易知，当电网阻抗或有功电流增大时均会导致阻抗交截频率变小，因此图 9(a)的中心频率f_c呈现出由最轻工况(L_g=10 mH，I_d=20 A)向最恶劣工况(L_g=16 mH，I_d=40 A)逐渐减小的趋势。此外，对于较恶劣工况来说，要想达到相同的稳定裕度，其带通滤波器的作用范围和前馈强度均需尽可能增大，即需要 K 和 K_v 尽可能大；相反，当工况变轻时，即可适当地降低 K 和 K_v 以减小对原系统的影响程度。上述分析也证明了图 9(b)和图 9(c)的合理性。

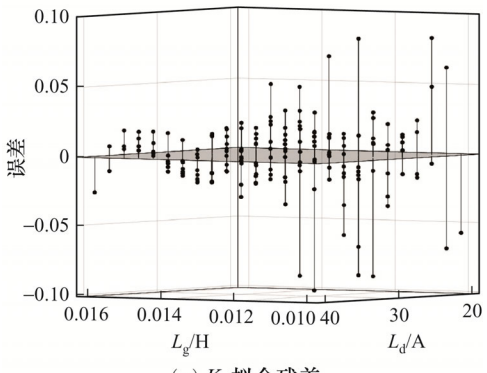
为了证明拟合结果的准确性，图 10 展示了 3 组拟合曲面的拟合残差分布，表 2 展示了 3 组拟合曲面的误差分析结果，其中 δ_{RMSE} 为统计回归标准误差 RMSE(root mean squared error)；R^2 为相关系数。由于中心频率 f_c 的选取是建立在理论阻抗交截频率的基础上的，因此其整体拟合效果较优；相比之下，由于 K 对系统裕度影响的单调性相对较弱，其在局部可能存在小幅波动，因此其误差相对稍大，但均保持在合理范围内。此外，由误差分析结果易



(a) f_c拟合残差



(b) K拟合残差



(c) K_V拟合残差

图 10 前馈通路参数拟合残差

Fig. 10 Fitting residue of feedforward path parameters

表 2 曲面拟合误差分析结果

Tab. 2 Error analysis results of surface fitting

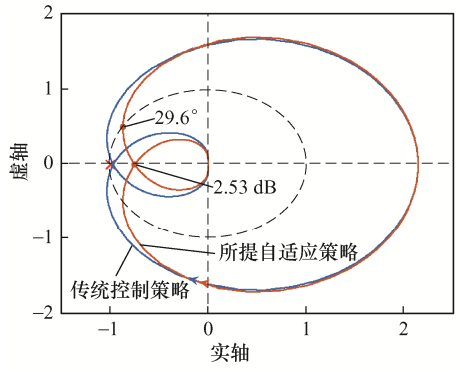
拟合曲面	δ_{RMSE}	R^2
f_c拟合曲面	0.438 770	0.998 250
K拟合曲面	0.652 970	0.982 290
K_v拟合曲面	0.026 793	0.990 530

知，3 组拟合结果的 δ_{RMSE} 较小，且 R^2 结果较为接近 1。因此，在误差允许的范围内，有理由认为采用该拟合关系可实现针对实时功率和电网阻抗的前馈通路参数自适应调节，能够实现将并网逆变器系统的稳定裕度始终保持在期望裕度附近。

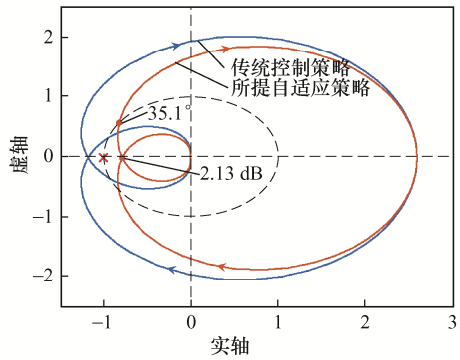
通过将上述拟合多项式部署于实际逆变器数字控制系统中，可实现根据所感知的实时功率和电网阻抗对前馈通路参数进行自适应地计算更新。其中，实时有功电流 I_d 可由 DSP 自身给定，实时电网阻抗 L_g 可通过在闭环系统中叠加小信号扰动，并通过 DSP 芯片进行响应提取来得到[23-24]。

3.4 典型工况稳定性分析

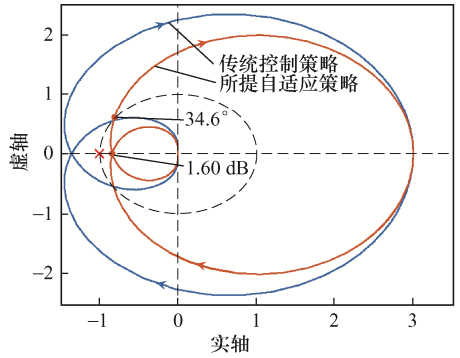
为验证所提自适应虚拟阻抗重塑策略在宽工况范围内的有效性，本节设计了若干典型弱网工况，并分析了其加入自适应虚拟阻抗策略前后的稳定性，其结果分别如图 11 和图 12 所示。其中，图 11 展示了额定功率时，在不同电网阻抗条件下并网逆变器系统阻抗比的 Nyquist 曲线；图 12 展示了相同电网阻抗时，在不同输出功率条件下并网逆变器系统阻抗比的 Nyquist 曲线。



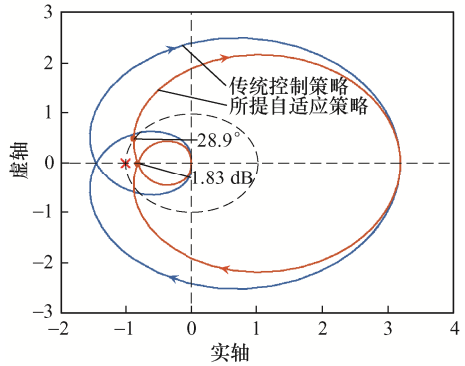
(a) L_g=11 mH, I_d=30 A



(b) L_g=13 mH, I_d=30 A



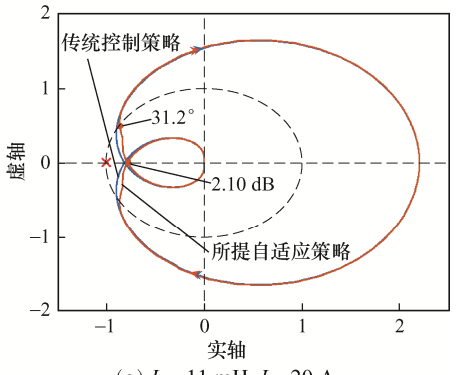
(c) L_g=15 mH, I_d=30 A



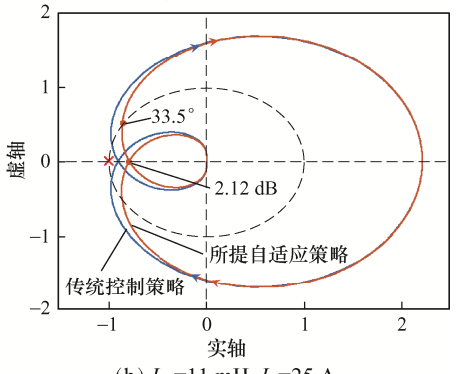
(d) L_g=16 mH, I_d=30 A

图 11　不同电网阻抗工况下的阻抗比奈奎斯特曲线

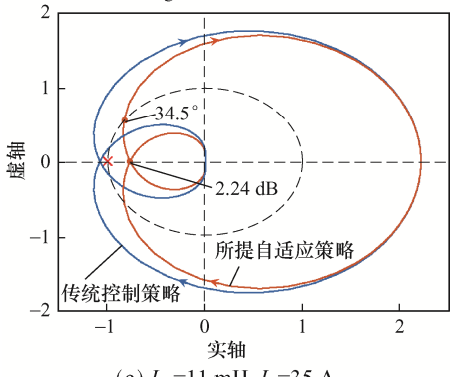
Fig. 11 Nyquist curves of impedance ratio under different grid impedance conditions



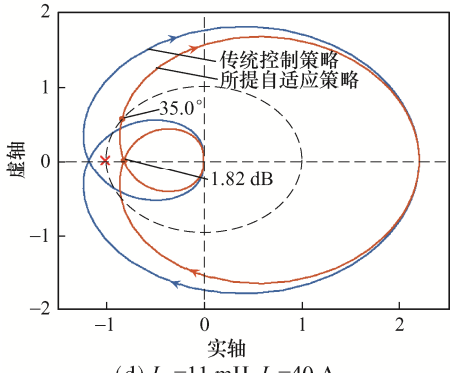
(a) L_g=11 mH, I_d=20 A



(b) L_g=11 mH, I_d=25 A



(c) L_g=11 mH, I_d=35 A



(d) L_g=11 mH, I_d=40 A

图 12　不同输出功率工况下的阻抗比奈奎斯特曲线

Fig. 12 Nyquist curves of impedance ratio under different output power conditions

由图 11 和图 12 分析可知，采用传统控制策略下，并网逆变器随着电网阻抗或输出功率的增加，其级联稳定裕度逐渐降低，并网稳定性逐渐恶化，甚至发生失稳现象；而采用本文所提自适应策略的并网逆变器在多个示范工况下均能保证有 2 dB 和 30° 左右的稳定裕度。因此，在拟合和优化算法误差允许的前提下，可以认为本文所提策略有力增强了并网逆变器系统面对不同工作场景的适应能力。

此外，加入自适应虚拟阻抗前后阻抗比 Nyquist 曲线差异大小可近似反映自适应虚拟阻抗对原有系统的影响程度，由图 11~12 分析可知，当电网阻抗或输出功率较小时(即较轻工况下)，加入虚拟阻抗前后的阻抗比 Nyquist 曲线重合度高，表明当前所取的通带宽度 K 和前馈系数 K_v 较小，实现了对原系统的精确阻抗重塑，对原系统的影响小。随着工作场景逐渐趋于恶劣，为始终保证恒定的稳定裕度，其前馈强度需逐渐提升，阻抗比 Nyquist 曲线的差异也逐渐放大。上述分析表明本文所提策略能在保证稳定裕度的前提下尽可能控制对原系统的影响。

4 仿真与实验验证

4.1 典型工况实验验证

本文搭建图 1 所示的逆变器系统对所提并网逆变器自适应虚拟阻抗策略开展相关实验验证。相关参数见表 1，搭建的 OPAL-RT 半实物实验平台如图 13 所示。其中，主电路部分由 OP5607(FPGA)实现，控制部分由 OP5600(CPU)实现，系统通过高速数据总线进行实时信号交互。

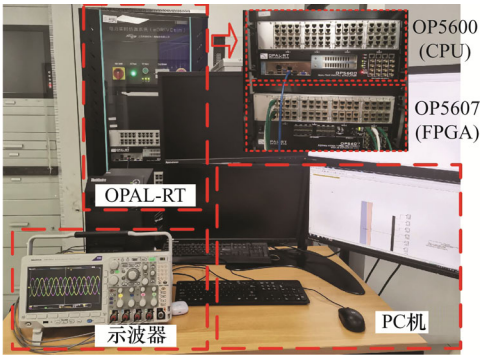
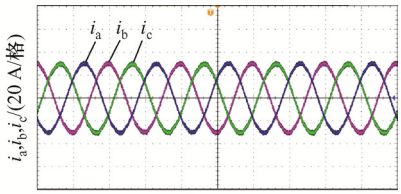


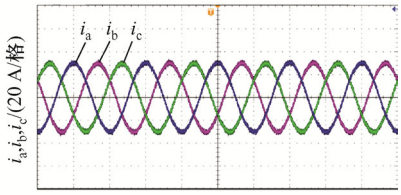
图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

选取若干典型工况进行实验验证。图 14~图 16 分别给出了逆变器在额定工况运行时，不同电网阻抗下加入所提控制策略前后的三相入网电流波形。由图 14 分析可知，当 L_g=11 mH 时，加入所提控制策略前后的三相入网电流均是稳定的，但由前文分析可知此时传统控制策略下的逆变器系统已濒临失稳；由图 15、图 16 分析可知，当 L_g=13 mH 或 15 mH 时，采用传统控制策略前的三相入网电流出现了振荡失稳情形，而加入所提控制策略后可明显改善系统稳定性，使系统重新稳定。



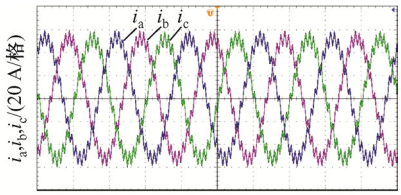
(a) 传统控制策略



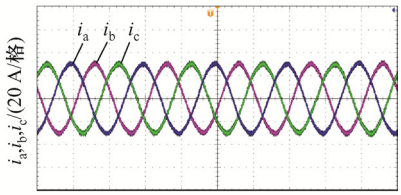
(b) 所提自适应策略

图 14 I_d=30 A、L_g=11 mH 时三相电流波形

Fig. 14 Three-phase current waveforms when I_d=30 A and L_g=11 mH



(a) 传统控制策略



(b) 所提自适应策略

图 15 I_d=30 A、L_g=13 mH 时三相电流波形

Fig. 15 Three-phase current waveforms when I_d=30 A and L_g=13 mH

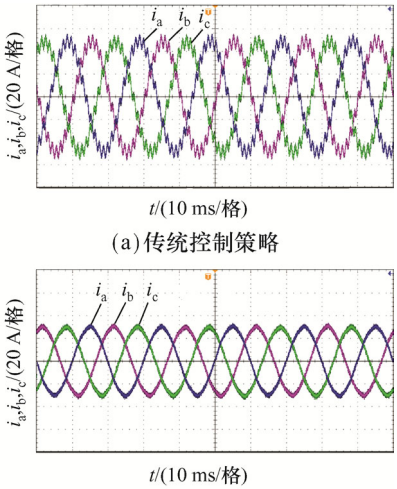


图 16　I_d=30 A、L_g=15 mH 时三相电流波形

Fig. 16 Three-phase current waveform when I_d=30 A and L_g=15 mH

此外，图 17 展示了 L_g=11 mH 时采用不同控制策略下并网逆变器的额定功率由其 67%跳变至其 133%时的动态情形。图 17(a)表明，当采用传统控制策略时，随着输出功率的增大，系统发生了失稳现象；图 17(b)表明，当采用所提控制策略时，随着输出功率的增大，系统可对前馈通路进行自适应调节，使系统始终保持稳定，且具备良好的动态调节性能。上述分析表明，本文所提自适应控制策略可增强并网逆变器对不同工作场景的适应能力，系统始终稳定。

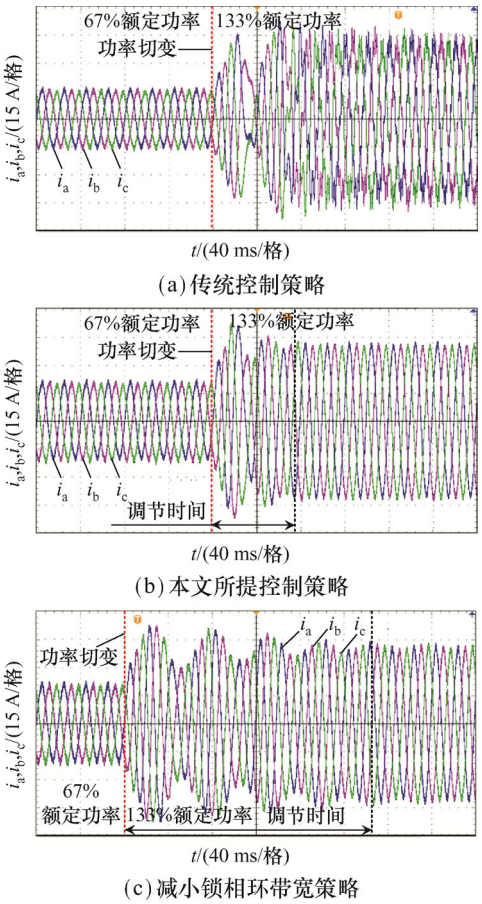


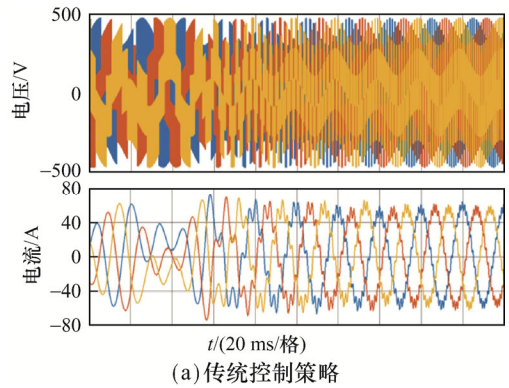
图 17　不同控制策略下的工况切变波形

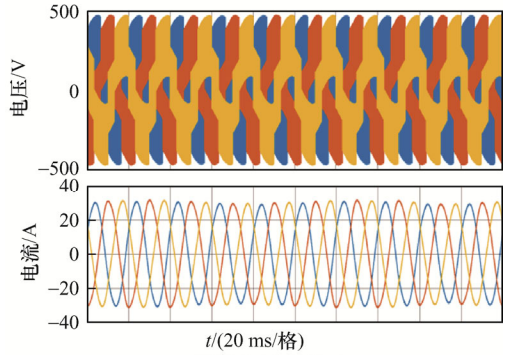
Fig. 17 Waveforms of power variation under different control strategies

为了对比验证本文所提自适应控制策略的动态调节性能，图 17(c)给出了通过减小锁相环带宽策略(K_{pp}=1，K_{pi}=50，保证最恶劣情形下的稳定)改善稳定性的并网逆变器在工况切变时的动态情形。通过与图 17(b)的对比易得，本文所提自适应控制策略有效保证了系统在不同工况下的稳定性和动态性能的平衡。

4.2　考虑电压谐波影响的策略有效性验证

在实际并网系统中，其交流侧的电压往往会包含除基频外的谐波分量。为了进一步模拟实际系统，本节将验证所提自适应虚拟阻抗策略在非理想电压情形下的有效性。以 L_g=12 mH、I_d=30 A 失稳情形为例，考虑包含 3 次、5 次谐波与阻抗交截频率(60 Hz)谐波的非理想电网电压和电流情形，图 18 给出了加入自适应策略前后的并网点电压和电流波形，图 19 进一步给出了加入自适应策略后 PCC 的电压和电流的傅里叶(FFT)分析结果。由两图可知，加入自适应控制前的系统出现了振荡失稳现象，而加入自适应控制后的系统仍能保持稳定，因此在非理想电网情形下，所提自适应策略仍能较好地保证并网逆变器系统的稳定性。

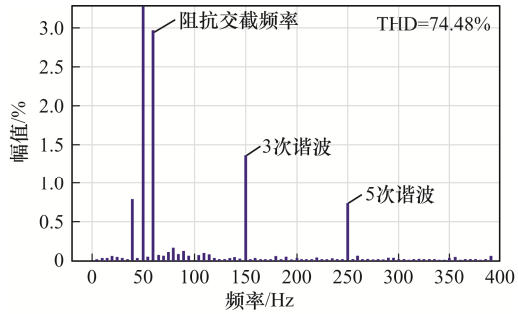




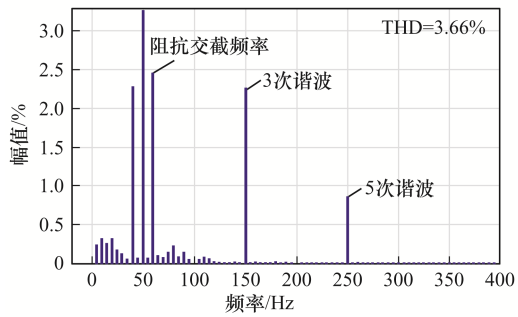
(b) 所提自适应策略

图 18 加入自适应策略前后的并网点电压、电流波形

Fig. 18 PCC voltage and current waveforms before and after adding adaptive strategy



(a) 电压FFT



(b) 电流FFT

图 19 并网点电压、电流 FFT 分析

Fig. 19 FFT analysis of PCC voltage and current

5 结论

本文以三相 L 滤波并网逆变器为例，提出了一种基于电压前馈的自适应虚拟阻抗重塑方案，得到以下结论：

(1)现有并网逆变器稳定性治理方案普遍针对恶劣工况进行设计，较为保守且不能较好地适应变化工况的情形。相比之下，本文所提自适应策略综合考虑了电网阻抗和输出功率的变化，对变化工况情形的适应度较好。

(2)所提自适应策略可根据当前系统的电网阻抗和有功电流，自适应调节电压前馈通路参数，保证了系统在不同工作条件下均可具备较优的稳定裕度，同时在一定程度上兼顾了控制性能，算法简单且易于实现。

下一步将持续研究所提方案在更宽工况范围内的适用性，并考虑加入其他形式的虚拟阻抗方式。

参考文献：

[1] 刘芳, 刘威, 汪浩东, 等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 95-114.
Liu Fang, Liu Wei, Wang Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-114. (in Chinese)

[2] Wang Xuehua, Qin Kuang, Ruan Xinbo, et al. A robust grid-voltage feedforward scheme to improve adaptability of grid-connected inverter to weak grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2384-2395.

[3] Lin Zhiheng, Ruan Xinbo, Wu Liguo, et al. Multi resonant component-based grid-voltage-weighted feedforward scheme for grid-connected inverter to suppress the injected grid current harmonics under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9784-9793.

[4] Sun Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

[5] 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.

[6] 高磊, 吕敬, 马骏超, 等. 基于电路等效的并网逆变器失稳分析与稳定控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2325-2341.
Gao Lei, Lü Jing, Ma Junchao, et al. Instability analysis and stability control of grid-connected inverter based on

impedance circuit equivalent [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2325-2341. (in Chinese)

[7] Wang Xiongfei, Harnefors L, Blaabjerg F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.

[8] 王赟程, 陈新, 张旸, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3843-3853.
Wang Yuncheng, Chen Xin, Zhang Yang, et al. Frequency characteristics analysis and stability research of phase locked loop for three-phase grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3843-3853. (in Chinese)

[9] 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 filtered grid-connected inverters under high permeability [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3938-3948. (in Chinese)

[10] 李苏丹, 曾成碧, 苗虹, 等. 适用于弱电网的三相并网逆变器锁相环设计[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 27-35.
Li Sudan, Zeng Chengbi, Miao Hong, et al. Phase-locked loop design of three-phase grid-connected inverter for weak grid [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 27-35. (in Chinese)

[11] 徐海亮, 张伟杰, 林鸿彬. 一种提高并网逆变器无源性的阻抗重塑方法[J]. 电源学报, 2025: 23(3): 269-279.
Xu Hailiang, Zhang Weijie, Lin Hongbin. Impedance remodeling method for improving passivity of grid-connected inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025: 23(3): 269-279. (in Chinese)

[12] 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.

[13] Jia Lei, Ruan Xinbo, Zhao Wenxin, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9561-9574.

[14] Li Ming, Zhang Xing, Guo Zixuan, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.

[15] 高家元, 黄帅, 姜飞, 等. 弱电网下基于比例权重的控制环参数自适应调整并网逆变器稳定性提升方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7846-7859.
Gao Jiayuan, Huang Shuai, Jiang Fei, et al. Stability improvement method of grid-connected inverter based on proportional weight control loop parameters adaptive adjustment under weak grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7846-7859. (in Chinese)

[16] 杨苓, 陈燕东, 周乐明, 等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3792-3804, 4020.
Yang Ling, Chen Yandong, Zhou Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804, 4020. (in Chinese)

[17] 叶华, 霍健, 刘玉田. 基于 Pade 近似的时滞电力系统特征值计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 25-30.
Ye Hua, Huo Jian, Liu Yutian. A method for computing eigenvalue of time-delayed power systems based on Pade approximation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 25-30. (in Chinese)

[18] 屠一鸣, 刘进军, 刘增, 等. 基于阻抗的数字延时对单电流环控制型并网逆变器稳定性影响的分析[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 63-72.
Tu Yiming, Liu Jinjun, Liu Zeng, et al. Impedance-based analysis of influences of digital control delay on the stability of single current loop-controlled grid-tied inverter [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2): 63-72. (in Chinese)

[19] 李元香, 项正龙, 夏界宁. 模拟退火算法的动力系统模型及收敛性分析[J]. 计算机学报, 2019, 42(6): 1161- 1173.
Li Yuanxiang, Xiang Zhenglong, Xia Jiening. Dynamical

system models and convergence analysis for simulated annealing algorithm [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(6): 1161-1173. (in Chinese)

[20] 肖白, 李道明, 穆钢, 等. 基于 SA-PSO 算法优化 CNN 的电能质量扰动分类模型[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 185-190.
Xiao Bai, Li Daoming, Mu Gang, et al. Power quality disturbance classification model based on CNN optimized by SA-PSO algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 185-190. (in Chinese)

[21] Sudibyo S, Murat M N, Aziz N. Simulated annealing-particle swarm optimization (SA-PSO): Particle distribution study and application in neural Wiener-based NMPC [C]//2015 10th Asian Control Conference (ASCC). Kota Kinabalu, Malaysia, 2015: 1-6.

[22] Wang Bing, Zhang Pengfei, He Yufeng, et al. Scenario-oriented hybrid particle swarm optimization algorithm for robust economic dispatch of power system with wind power [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(5): 1143-1150.

[23] 张禹风, 杨淑英, 谢震, 等. 基于多正弦信号注入的大功率并网逆变器电网阻抗在线测量技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 4026-4038.
Zhang Yufeng, Yang Shuying, Xie Zhen, et al. On-line measurement of grid impedance for large capacity grid-tied inverter based on multiple-sinusoidal signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4026-4038. (in Chinese)

[24] 凌子涵, 许津铭, 宗林, 等. PQ 扰动型电网阻抗估计方法的误差分析与改进策略[J/OL]. 电源学报, 2024: 1-14. (2024-07-03)[2024-07-09]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240703.1108.002.html.
Ling Zihan, Xu Jinming, Zong Lin, et al. Error analysis and improvement strategy of PQ variation based grid impedance estimation method [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024: 1-14. (2024-07-03)[2024-07-09]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240703.1108.002.html. (in Chinese)



张琳

作者简介：

张琳(1980—)，女，博士，高级工程师。研究方向：电力系统稳定与控制、电力市场分析、智能信息处理技术及其在电力系统中的应用等。E-mail：12310086@zju.edu.cn。

游龙翔(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源电力系统建模和稳定性分析等。E-mail：22310061@zju.edu.cn。

宋美艺(1994—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化、电力系统继电保护等。E-mail：12310084@zju.edu.cn。

曹苗(1988—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统通信技术研究及应用等。E-mail：youlx16@nuaa.edu.cn。

严薇(1991—)，女，硕士，工程师。研究方向：电力系统及其自动化、电力系统继电保护等。E-mail：bosunzhang@nuaa.edu.cn。

张欣(1985—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，研究员。研究方向：新能源系统稳定性防治、宽禁带半导体器件智能封装应用和电力电子中的人工智能技术等。E-mail：zhangxin_ieee@zju.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)