引用格式:赵铁英,田培建,李俊然,等.极弱电网下并网逆变器自适应改进前馈策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):269-281.
Citation:ZHAO Tieying, TIAN Peijian, LI Junran, et al. Adaptive improvement of feedforward strategy for grid-connected inverter under extremely weak current network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):269-281.

极弱电网下并网逆变器自适应改进前馈策略

赵铁英[1,2],田培建[1,2],李俊然[1,2],黄志远[1,2],祁昱昂[1,2]
(1.河南理工大学电气工程与自动化学院,河南 焦作 454003;2.河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室,河南 焦作 454003)

摘　要:在极弱电网条件下,并网逆变器引入网压比例前馈控制策略来提升低频段幅值增益并抑制电网背景谐波干扰。但当电网阻抗参数增大时,系统的相位裕度会显著下降,出现失稳现象。对此,提出一种极弱电网下并网逆变器自适应改进前馈策略。先基于阻抗特性分析方法,分析系统相位裕度恶化的内在机理,提出在前馈通道上串联二阶低通滤波器来提高系统的相位裕度,并尽可能保留其在低频的增益效果的方法;再提出采用在线阻抗检测技术与结合遗传优化算法的自适应参数设计方法,提高参数设计效率,进而提高并网逆变器在极弱电网环境下的鲁棒性;最后,通过仿真与试验验证所提方法的可行性与有效性。

关　键　词:极弱电网;二阶低通滤波器;并网逆变器;遗传优化算法;自适应参数设计
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.024　**中图分类号**:TM464　**文章编号**:1673-9140(2025)04-0269-13

Feedforward strategy of adaptive improvement for grid-connected inverter with extremely weak grid

ZHAO Tieying[1,2], TIAN Peijian[1,2], LI Junran[1,2], HUANG Zhiyuan[1,2], QI Yuang[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Inspection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: With an extremely weak grid, grid-connected inverters introduce the grid voltage proportional feedforward control strategy to enhance the amplitude gain in the low-frequency band and suppress the background harmonic interference of the grid. However, when the impedance parameter of the grid increases, the phase margin of the system significantly decreases, and instability occurs. Based on the impedance characteristic analysis method, the internal mechanism of the deterioration of the system's phase margin is first revealed, and then proposes to connect a second-order low-pass filter on the feedforward channel in series to improve the system's phase margin and retain its gain effect at low frequencies as much as possible. However, since the parameters of the added controller are too complex and not flexible enough by using the traditional parameter design method, an adaptive parameter design method combining online impedance detection technology and a genetic optimization algorithm is proposed to improve the parameter design efficiency and thereby enhance the robustness of grid-connected inverters in extremely weak grid environments. Finally, its effectiveness is verified through simulation and experimental results.

Key words: extremely weak grid; second-order low-pass filter; grid-connected inverter; genetic optimization algorithm; adaptive parameter design

近年来,环境污染问题日趋严峻,且传统化石能源储备不断减少,以风力发电和光伏发电为代表的清洁能源技术得到了快速发展[1-3],分布式可再生能源发电技术已得到了学术界与工业界的普遍重视[4-7]。并网逆变器作为分布式可再生能源发电系统的核心装置,其输出电能质量直接影响电网的稳

收稿日期:2024-09-30;**修回日期**:2025-03-24
基金项目:国家自然科学基金(U1804143);河南理工大学博士基金(B2014-027);河南省自然科学基金(252300421329);
通信作者:田培建(1998—),男,硕士,主要从事并网逆变器控制理论等方面的研究;E-mail:1368640863@qq.com

定，且该设备的运行效率与电网系统经济性密切相关[8-9]。

电网电压比例前馈控制可有效抑制电网背景谐波干扰。然而，在弱电网工况下，该策略与并网逆变器电流环之间会产生不利耦合效应，导致系统动态性能恶化[10-12]。文献[13-14]针对弱电网条件下的稳定性问题，采用基于阻抗在线辨识的自适应电流控制策略，通过动态补偿机制提升系统稳定裕度。但受限于阻抗测量误差的固有特性，该方法的控制性能仍依赖测量精度。为提升并网逆变器在电网阻抗变化工况下的谐波抑制能力，文献[15-16]在前馈控制环节引入了参数可调的多谐振控制器，利用自适应控制策略调整谐振控制器参数，有效抑制电网高次谐波，显著增强了系统在背景谐波干扰下的运行稳定性。为解决并网逆变器的稳定性问题，文献[17-18]采用阻抗重塑技术构建虚拟阻抗。但该方法的实际应用存在2个主要技术瓶颈：虚拟阻抗引入的高频微分环节会放大电网背景谐波分量；微分环节的精确实现受到实际硬件电路采样精度和运算速度的限制。为有效抑制电网背景谐波对系统的影响，文献[19-20]采用基于电网电压的全前馈控制方案，但该方法的实现面临关键挑战：前馈通道中的微分环节在工程实践中存在实现困难的问题。文献[21-23]提出了在并网逆变器前馈控制回路中引入陷波器与低通滤波器级联结构，将数字滤波环节等效为串联型有源阻尼（active damping，AD）的方法。此方法虽然可以显著衰减LCL型滤波器导致的谐振峰值现象，但滤波环节的相位滞后特性会导致系统开环带宽显著减小，影响其动态响应性能。文献[24-25]针对电网阻抗与电压前馈环节的交互影响问题，提出了一种基于改进型非理想广义积分器的电网电压前馈控制策略。该方法显著增强了并网逆变器在不同电网阻抗条件下的运行稳定性，有效提升了系统的整体鲁棒性。文献[26]在并网逆变器控制策略中引入频率自适应调节机制与多权重因子的优化控制策略，通过参数协同调节有效改善了系统的动态响应特性。但其控制结构中增加了多个可调参数，导致参数整定困难，这对系统优化设计提出了更高要求。

为提高并网逆变器在极弱电网条件下的运行稳定性，本研究基于阻抗分析法建立了系统等效输出阻抗模型。通过理论分析可知，电网电压前馈环节会显著降低系统在高阻抗电网工况下相位裕度。为此，本研究提出在前馈通道中嵌入二阶低通滤波器以改善系统稳定性，并采用在线阻抗检测与遗传算法协同优化的自适应参数整定方法，提升了控制器的参数设计效率与适应性。仿真与试验结果均表明所提控制策略能够显著拓展并网逆变器的电网阻抗适应范围。

1 并网逆变器等效输出阻抗模型

1.1 极弱电网下并网逆变器等效输出阻抗模型

图1为单相LCL并网逆变器模型结构；在图1中，该模型存在一个锁相环（phase locked loop，PLL）采用双极性正弦脉冲调整（sine pulse width modulation，SPWM）；S_1、S_2、S_3、S_4为4个开关管，其共同构成逆变桥的2个桥臂；V_{in}为直流侧输入电压；L_g为电网电感；i_g、v_g分别为并网电流、并网电压；v_{inv}为逆变桥输出电压；i_c为滤波电容电流；L_1、C、L_2分别为并网逆变器的逆变器侧电感、滤波电容以及电网侧电感。电网等效阻抗Z_g通常由电阻分量和电感分量构成。其中，电阻分量对系统稳定性具有积极作用。为考虑最恶劣工况，本研究假设Z_g为纯感性阻抗；并网逆变器锁相环模块对公共耦合点电压u_{pcc}进行实时检测与跟踪，输出的同步相位信号θ与电流外环控制器产生的基准电流I^*进行矢量合成，最终生成并网电流并网电流参考指令i_{ref}。其中，K_d为电容电流阻尼系数；H_f为电网电压前馈系数；U_m为控制环路输出的调制信号。本方案采用准比例谐振控制器实现并网电流跟踪控制，其传递函数$G_c(s)$的表达式为

$$G_c(s)=K_P+\frac{2K_r\omega_i s}{s^2+2\omega_i s+\omega_o^2} \tag{1}$$

式中，K_p、K_r、ω_i、ω_o分别为比例系数、基频谐振系数、截止频率调整参数、基波角频率；s为拉普拉斯变换中的复变量。

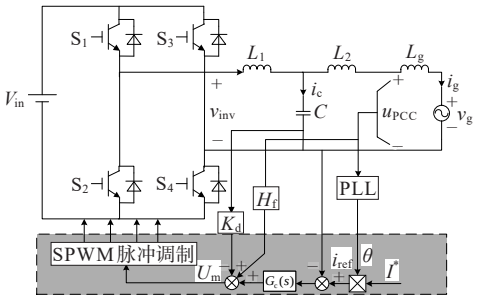


图1 单相LCL并网逆变器拓扑结构

Figure 1 Topology structure of single-phase LCL grid-connected inverter

并网逆变器结构控制框如图 2 所示。在图 2 中，等效增益参数 K_{pwm} 表征了逆变桥的电压转换特性，其数值表达式为直流输入电压 V_{in} 与三角载波峰值 V_{tri} 的比值，即

$$K_{pwm}=\frac{V_{in}}{V_{tri}} \tag{2}$$

前馈系数 H_f 的表达式为

$$H_f=\frac{1}{K_{pwm}} \tag{3}$$

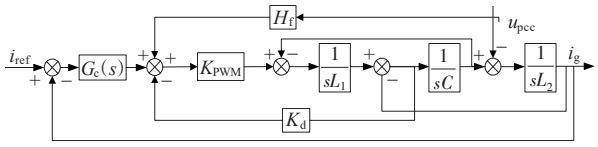


图 2　并网逆变器结构控制框

Figure 2　Control block diagram of grid-connected inverter structure

对图 2 所示过程进行等效变换与简化，得到网压比例前馈逆变器简化控制框，如图 3 所示。

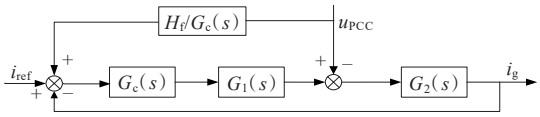


图 3　网压比例前馈简化控制框

Figure 3　Simplified control block diagram of grid voltage proportional feedforward

分析图 3，可得 $G_1(s)$，$G_2(s)$ 表达式，即

$$G_1(s)=\frac{K_{pwm}}{L_1Cs^2+K_dK_{pwm}Cs+1} \tag{4}$$

$$G_2(s)=\frac{L_1Cs^2+K_dK_{pwm}Cs+1}{L_1L_2Cs^3+K_dK_{pwm}L_2Cs^2+(L_1+L_2)s} \tag{5}$$

经过计算可得系统的开环传递函数 $T_o(s)$ 为

$$T_o(s)=G_1(s)G_2(s)G_c(s)=\frac{K_{pwm}G_c(s)}{L_1L_2Cs^3+K_dK_{pwm}L_2Cs^2+(L_1+L_2)s} \tag{6}$$

为明确表示网压比例前馈对并网逆变器的影响，视此时的电流基准值 i_{ref} 输入为 0 A，得到输出电流 $i_g(s)$ 的表达式：

$$i_g(s)=-\left(\frac{G_2(s)}{1+T_o(s)}-\frac{H_fT_o(s)}{(1+T_o(s))\cdot G_c(s)}\right)u_{pcc}(s) \tag{7}$$

根据式(7)推导出并网逆变器的等效输出阻抗数学模型，其结果如图 4 所示。

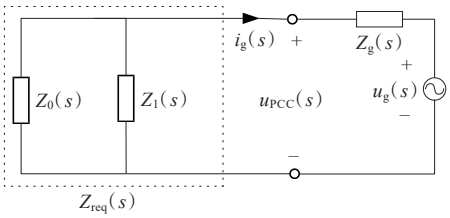


图 4　并网逆变器输出阻抗数学模型

Figure 4　Mathematical model of output impedance of grid-connected inverter

在图 4 中，并网逆变器等效输出阻抗 $Z_{req}(s)$ 是 $Z_0(s)$、$Z_1(s)$ 并联后的等效阻抗；$Z_0(s)$ 为并网逆变器无前馈系统固有等效阻抗；$Z_1(s)$ 为网压比例前馈引入的等效阻抗；$Z_g(s)$ 为电网阻抗。其表达式分别为

$$Z_0(s)=\frac{1+T_o(s)}{G_2(s)} \tag{8}$$

$$Z_1(s)=-\frac{1+T_o(s)}{H_fT_o(s)/G_c(s)} \tag{9}$$

$$Z_g=sL_g \tag{10}$$

$$Z_{req}(s)=\frac{1+T_o(s)}{G_2(s)-H_fT_o(s)/G_c(s)} \tag{11}$$

1.2　并网逆变器稳定性分析

在极弱电网运行工况下，电网阻抗对并网逆变器系统的稳定性影响不可忽略。为深入分析该影响机制，本文采用阻抗分析法进行理论分析。根据文献[27]的研究结论，逆变器在电网阻抗变化条件下维持稳定运行需满足 2 个关键判据：当 $Z_g=0$ mH 时，系统可保持稳定运行；当 $Z_g\neq 0$ mH 时，Z_g/Z_{req} 应满足阻抗稳定判据，即电网阻抗与逆变器等效输出阻抗的相频特性曲线交点处相位角 φ 需满足 $\varphi>0°$（即相位裕度 $I_{PM}>0$）。相位裕度 I_{PM} 的计算式为

$$I_{PM}=180°-\arg[Z_g(2\pi f_g)]+\arg[Z_{req}(2\pi f_g)] \tag{12}$$

在极端工况下，将电网阻抗视为纯感性元件，则系统稳定性判据可转化为以下形式：

$$\arg\left[Z_{req}\left(2\pi f_g\right)\right]>-90° \tag{13}$$

图 5 为并网逆变器等效输出阻抗 bode 图，其展示了未引入前馈控制与采用前馈控制策略时的并网逆变器的等效输出阻抗特性。

从图 5 中可看出，当不加入网压比例前馈时，系统的稳定裕度不会随电网阻抗的变化发生改变，始终稳定。当在前馈通道上加入网压比例前馈时，并网逆变器系统在低频段输出阻抗幅值特性得到显

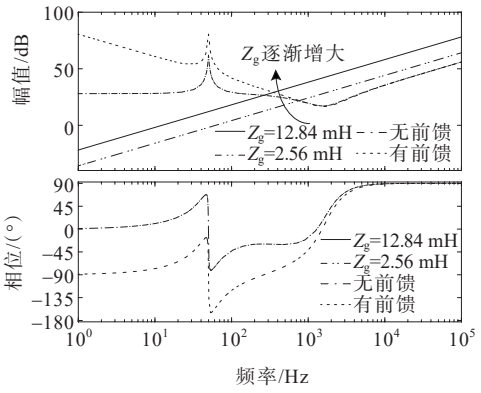


图5 并网逆变器等效输出阻抗bode图

Figure 5 Bode plot of equivalent output impedance of grid-connected inverter

著增强;但随着电网阻抗逐渐增大,系统相位裕度显著降低;此时,相位裕度的恶化将直接导致系统鲁棒性下降,最终可能导致并网逆变器的失稳现象。为更明确地分析网压比例前馈对系统相位特性的影响,可将式(11)的等效变换改写为

$$Z_{\mathrm{req}}(s)=\frac{1+T_{\mathrm{o}}(s)}{G_2(s)-H_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{o}}(s)/G_{\mathrm{c}}(s)}=\frac{1+T_0(s)}{G_2(s)}\cdot\frac{1}{1-H_{\mathrm{f}}G_1(s)}=Z_0(s)\cdot Z_{\mathrm{ext}}(s) \tag{14}$$

式中,$Z_{\mathrm{ext}}(s)$为网压比例前馈引入的阻抗附加分量。

含网比例前馈逆变器额外附加阻抗bode图如图6所示。根据式(14),可得到到图6中$Z_{\mathrm{req}}(s)$、$Z_{\mathrm{ext}}(s)$、$Z_0(s)$的值。

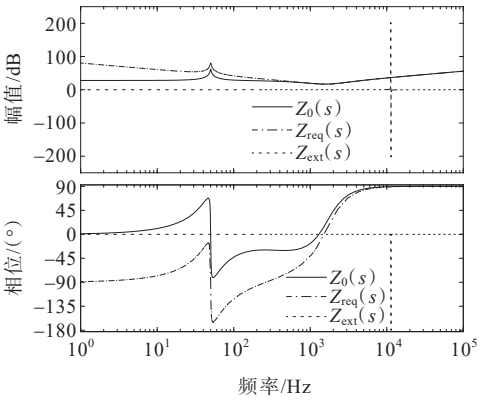


图6 含网压比例前馈逆变器额外附加阻抗bode图

Figure 6 Bode plot of additional impedance of grid voltage proportional feedforward inverter

由式(14)结合图6可知,网电压比例前馈所引入的附加阻抗分量$Z_{\mathrm{ext}}(s)$导致系统的相位特性发生显著变化,降低相位裕度,直接影响并网系统的鲁棒性。

逆变器等效输出阻抗向量变化示意如图7所示。从图7中可以看出,逆变器等效输出阻抗$Z_{\mathrm{req}}(s)$相量是由并网逆变器不含前馈的输出阻抗$Z_0(s)$与由并网逆变器网压比例前馈引入的阻抗附加项$Z_{\mathrm{ext}}(s)$这2个相量叠加得到的。阻抗附加项$Z_{\mathrm{ext}}(s)$的存在使得逆变器输出阻抗Z_0(s)的相角经过叠加下降了δ。因此,随着电网阻抗的增加,逆变器的相位裕度降低,系统鲁棒性大大减弱。

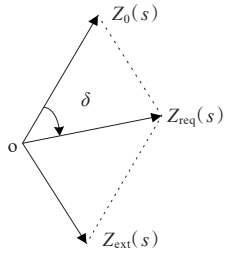


图7 逆变器等效输出阻抗相量变化示意

Figure 7 Schematic diagram of variation in equivalent output impedance vector of inverter

2 自适应改进策略

2.1 改进策略的实现

并网逆变器在极弱电网的环境下,随着电网阻抗的增加,含有网压比例前馈的并网逆变器难以满足系统的稳定性要求,并网逆变器的稳定性随着电网阻抗的增加而降低。为提高含有网压比例前馈的并网逆变器的相角裕度,提高系统的稳定性,应减小网压比例前馈对于系统输出阻抗的影响,提高系统的相位裕度。因此,本文提出一种在前馈通道上添加二阶低通滤波器的改进策略,通过提高系统的相位裕度来降低网压比例前馈对并网逆变器系统造成的影响,并尽可能地保留网压比例前馈在低频段的增益效果。其前馈添加二阶滤波器的传递函数$H_0(s)$的表达式为

$$H_0(s)=\frac{\omega_{\mathrm{n}}^2}{s^2+\frac{\omega_{\mathrm{n}}}{Q}s+\omega_{\mathrm{n}}^2} \tag{15}$$

式中,ω_{n}为截止角频率;Q为阻尼系数。

该二阶滤波器的bode图如图8所示。

当该二阶滤波器的相位变化范围为[0°,180°]时,可将其加入网压比例前馈通道,对其相位进行补偿。该并网逆变器改进控制策略控制框如图9所示。

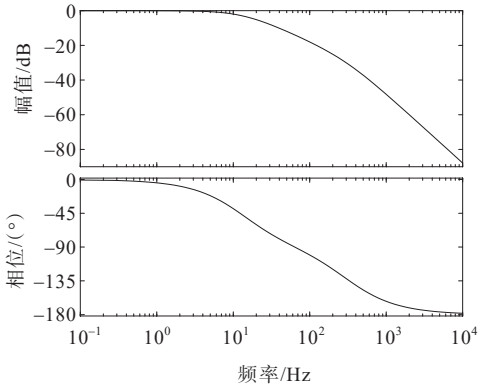


图 8　二阶低通滤波器 bode 图

Figure 8　Bode plot of second-order low-pass filter

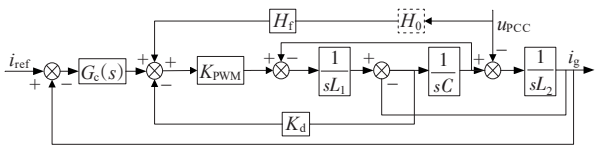


图 9　并网逆变器改进控制策略控制框

Figure 9　Control block diagram for improved control strategy of grid-connected inverter

为更清晰地表示改进策略对于并网逆变器输出阻抗的影响，将改进后系统输出阻抗表达式进行等效变换，即

$$Z'_{\mathrm{req}}(s)=\frac{1+T_{\mathrm{o}}(s)}{G_2(s)-H_0(s)H_{\mathrm{f}}(s)\dfrac{T_{\mathrm{o}}(s)}{G_{\mathrm{c}}(s)}}=\frac{1+T_0(s)}{G_2(s)}\cdot\frac{1}{1-H_0(s)H_{\mathrm{f}}(s)G_1(s)}=Z_0(s)\times Z'_{\mathrm{ext}}(s) \tag{16}$$

式中，$Z'_{\mathrm{req}}(s)$为改进后并网逆变器等效输出阻抗；$Z'_{\mathrm{ext}}(s)$为改进后并网逆变器的附加阻抗；$Z_0(s)$为未加网压比例前馈逆变器的输出阻抗，其 bode 图如图 10 所示。

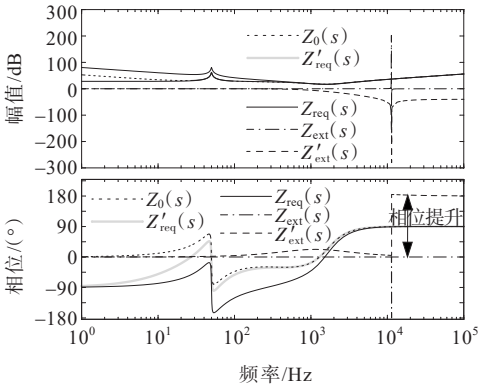


图 10　改进后 LCL 逆变器额外附加阻抗 bode 图

Figure 10　Bode plot of additional impedance of improved LCL inverter

结合图 10 与式(16)可知，改进策略将阻抗附加项 $Z_{\mathrm{ext}}(s)$的相位提高了近 180°，得到 $Z'_{\mathrm{ext}}(s)$，而其幅值却相对减小，将其与并网逆变器原始阻抗 $Z_0(s)$相量相叠加，得到改进后的并网逆变器等效输出阻抗 $Z'_{\mathrm{req}}(s)$，经过改进策略补偿的角度为 α，其相量变化示意如图 11 所示。

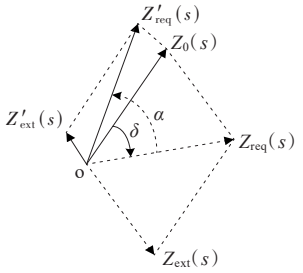


图 11　改进后逆变器输出阻抗相量变化示意

Figure 11　Schematic diagram of variations in output impedance vector of improved inverter

2.2　二阶低通滤波器传统参数设计

文 2.1 改进策略可以减少并网逆变器网压比例前馈导致的相位裕度降幅。而二阶低通滤波器的选取需要对 2 个未知参数(截止角频率 ω_{n}和阻尼系数 Q)进行参数设计。

将 $s=\mathrm{j}\omega$ 带入计算二阶滤波器的式(15)，则可得

$$H_0(\mathrm{j}\omega)=\frac{\omega_{\mathrm{n}}}{\omega_{\mathrm{n}}^2-\omega^2+\mathrm{j}\dfrac{\omega_{\mathrm{n}}}{Q}\omega} \tag{17}$$

式中，ω 为交截频率。

则二阶滤波器相位关系式为

$$\arg\big(H_0(\mathrm{j}\omega)\big)=-\arctan\frac{\dfrac{\omega_{\mathrm{n}}}{Q}\omega}{\omega_{\mathrm{n}}^2-\omega^2} \tag{18}$$

由式(18)可知，当截止角频率 ω_{n}和阻尼系数 Q 的取值不同时，二阶低通滤波器对并网逆变器的相位补偿角度也不同。结合式(16)，可以画出当截止角频率 ω_{n}不变时，阻尼系数 Q 变化时并网逆变器等效输出阻抗 bode 图与二阶低通滤波器相位关系，结果分别如图 12、13 所示。

分析图 12、13，可知当截止角频率 ω_{n}不变时，其相角随着阻尼系数 Q 的减小而逐渐增大；当阻尼系数 Q 不变时，相角取最大值时，截止角频率 ω_{n}的值不唯一。因此，本文二阶低通滤波器的参数阻尼系数 Q 取为 0.1。

由式(17)，得到二阶低通滤波器的幅值表达式，即

$$\left|H_0(\mathrm{j}\omega)\right|=\frac{\omega_n^2}{\sqrt{\left(\omega_n^2-\omega^2\right)^2+\left(\omega\frac{\omega_n}{Q}\right)^2}} \tag{19}$$

由式(19)可知，当二阶低通滤波器当阻尼系数 Q 不变时的二阶低通滤波器幅值的关系，如图14所示。结合式(16)，可绘制当阻尼系数 Q 不变，截止角频率 ω_n 变化时并网逆变器等效输出阻抗bode图，如图15所示。

从图14、15中可以看出，当 Q 不变时，ω_n 值越大，二阶低通滤波器幅值越大，并网逆变器等效输出阻抗在低频段的增益越大。因此，本文二阶低通滤波器的参数截止角频率 ω_n 取为1 000 Hz。

电网强度的量化表征通常采用短路容量比(short circuit ratio，SCR)这一关键指标，其数学表达式 I_{SCR} 为电网短路容量与并网逆变器额定容量之比。对单相并网系统，当 I_{SCR} 值不超过10时，可界定其为弱电网运行工况；当 I_{SCR} 降至2以下时，则将其归为极弱电网运行状态[28-29]。由式(16)，绘制

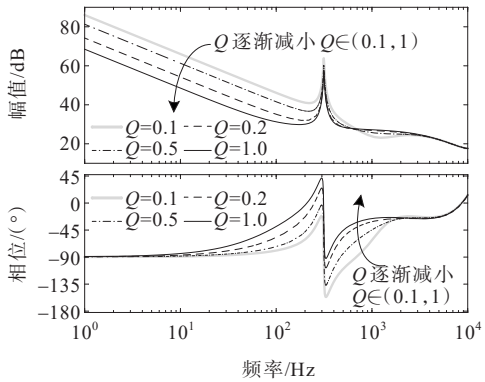


图12 ω_n 不变，Q 变化时的并网逆变器输出阻抗bode图

Figure 12 Bode plot of output impedance of grid-connected inverter with fixed ω_n and changing Q

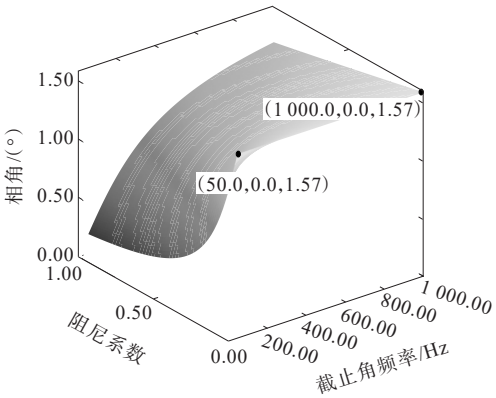


图13 二阶低通滤波器相位关系

Figure 13 Phase relationship of second-order low-pass filter

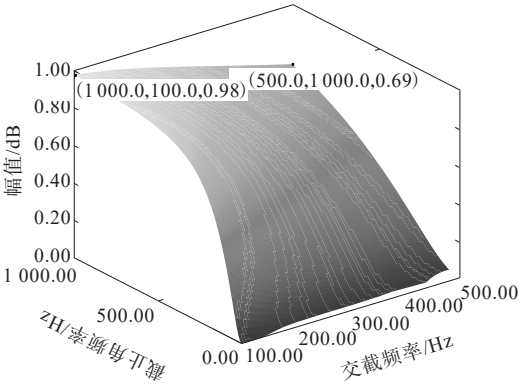


图14 二阶低通滤波器幅值关系

Figure 14 Amplitude relationship of second-order low-pass filter

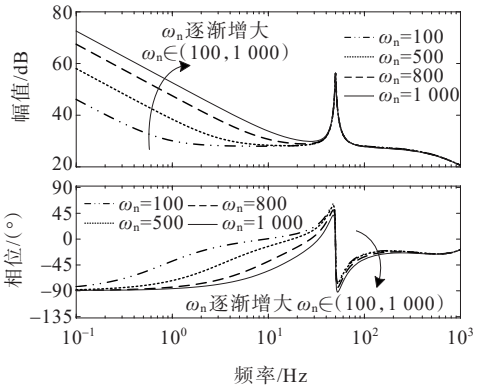


图15 Q 不变，ω_n 变化时并网逆变器输出阻抗bode图

Figure 15 Bode plot of output impedance of grid-connected inverter with fixed Q and changing ω_n

改进后的并网逆变器等效输出阻抗bode图，结果如图16所示。从图16中可以看出，当电网电感 L_g=12.84 mH(I_{SCR}=2)时，其相位裕度达到了58°，满足鲁棒性要求，提高了其在低频段的增益，故本文所设计参数符合要求。

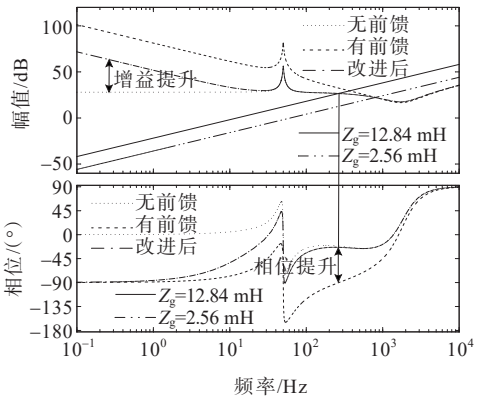


图16 改进后的逆变器等效输出阻抗bode图

Figure 16 Bode plot of equivalent output impedance of improved inverter

2.3　基于遗传算法二阶滤波器参数自适应整定

针对传统二阶低通滤波器参数设计方法存在双参数设计、复杂度高且难以适应电网阻抗的动态变化的局限性，本文创新性地提出了一种基于在线阻抗检测技术与遗传算法相结合的参数优化策略。该策略通过动态调整滤波器参数，显著提升了控制系统的灵活性与适应性，有效扩展了并网逆变器系统的阻抗适应范围。

在参数优化实现方面，本方案采用遗传算法作为核心算法，实现了控制器参数的动态自适应调整。具体优化流程包含3个关键步骤。

1）模型构建阶段。建立极弱电网条件下的并网逆变器等效模型，推导系统传递函数，并基于相位裕度 PM 指标构建遗传算法的目标优化函数。

2）参数优化阶段。通过 MATLAB 平台实现二阶低通滤波器参数的在线优化，采用迭代比较机制持续更新参数，最终选取最优参数组合。

3）验证评估阶段。将优化所得参数应用于仿真环境，进行系统性能验证。

该优化策略不仅突破了传统固定参数设计的局限性，还采用遗传算法实现了参数的自适应调整，为并网逆变器在复杂电网条件下的稳定运行提供了有效解决方案。

本文选取系统等效输出阻抗与电网阻抗相交频率点的相位裕度作为优化目标。基于在线阻抗检测技术，实时获取电网等效电感参数 L_{g_est}，并将其代入式(17)，即

$$\begin{cases} Z_g(s)=sL_{g_est} \\ \left|Z_{req}''(s)\right|=\left|Z_g(s)\right| \\ s=\mathrm{j}\omega_{int} \end{cases} \tag{20}$$

基于式(20)、(13)，可求解极弱电网工况下电网阻抗与逆变器输出阻抗的交点频率 ω_{int}。通过稳定性分析计算，获得系统相位裕度 I_{PM}，并以最小化相位偏差作为目标函数[29]，即

$$\begin{cases} \min f=\left|I_{PM}-60^{\circ}\right| \\ \text{s.t.}\begin{cases} 0<\omega_n<1\,200 \\ 0<Q<1 \end{cases} \end{cases} \tag{21}$$

本文采用4个步骤来实现并网逆变器的自适应控制。

1）采用在线阻抗检测技术实时获取电网电感估计值 L_{g_est}。

2）将检测所得 L_{g_est} 输入遗传优化算法，联合式(13)、(17)和(20)，计算系统相位裕度 I_{PM}。

3）依据式(21)的优化准则对遗传算法输出参数进行筛选，确定最优的二阶低通滤波器参数组合，包括截止角频率 ω_n 和阻尼系数 Q。

4）将优化后的 ω_n 和 Q 代入式(16)，最终求得并网逆变器的等效输出阻抗特性。

基于该优化方法，可得出如图17所示的遗传算法优化流程。

为验证所提方法的有效性，本文选取电网电感 L_g=12.84 mH（I_{SCR}=2）的典型弱电网工况作为测试条件，采用遗传算法对并网逆变器前馈通道中的二阶低通滤波器参数进行在线优化整定。并网逆变器具体参数如下：开关频率 f_s 为 10 kHz，直流侧输入电压 V_{in} 为 400 V；滤波电容 C 为 5 μF；功率 P 为 6 kW；逆变器侧电感 L_1 为 3 mH；并网侧输出电压 v_g 为 220 V；电网侧电感 L_2 为 1 mH；准比例谐振控制器的比例系数 K_p 为 0.063，谐振系数 K_r 为 3.14。

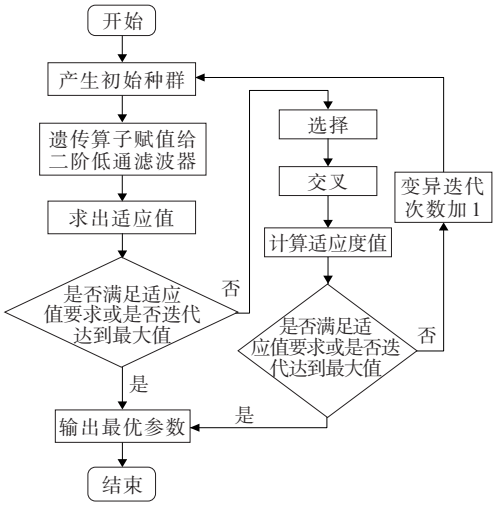
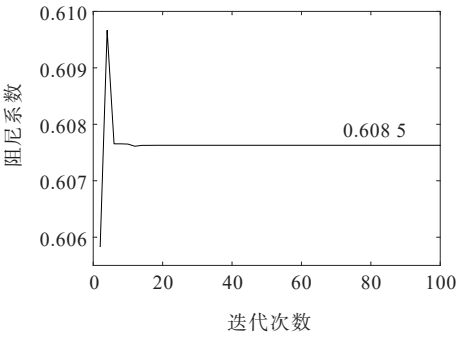


图 17　遗传优化算法流程

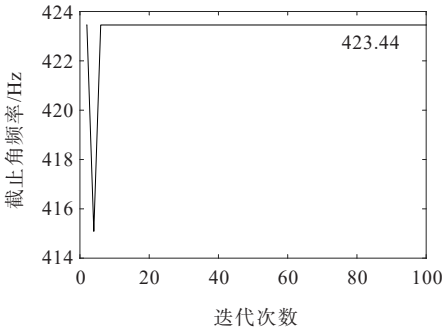
Figure 17　Flowchart of genetic optimization algorithm

在低通滤波器优化设计中，采用遗传算法对关键参数 ω_n 和 Q 进行优化设计。其中，ω_n 的优化区间设为(0，1 200)，Q 的取值范围设为(0，1)，并以 F 作为适应度评价指标。基于式(21)所建立的优化函数，结合图1所示的并网逆变器系统结构，通过遗传算法优化获得了二阶低通滤波器的最优参数。图18完整展示了遗传算法的优化流程及最终结果。经过100次迭代计算，系统相位裕度达到式(21)要求的60°设计指标。该优化结果表明，在电网电感为12.8 mH的运行条件下，控制器参数 ω_n 和 Q 的自适应最优值分别为423.44和0.608 5。

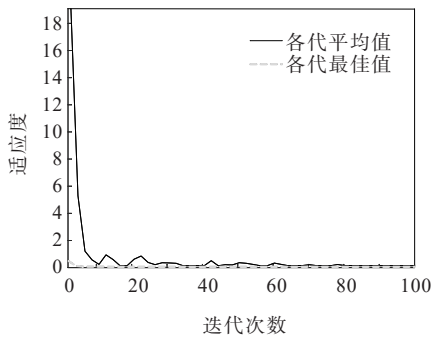
将这些经过遗传算法优化后的二阶滤波器自



(a) Q的迭代优化过程



(b) ω_n的迭代优化过程



(c) 适应度函数的迭代优化过程

图 18 遗传算法优化二阶滤波器参数过程与结果

Figure 18 Process and results of improving second-order filter parameters by genetic algorithm

适应参数带入式(16),得到如图19所示的并网逆变器自适应改进策略前、后的等效输出阻抗的bode图。从图19中可以看出,当电网电感为12.84 mH时,系统的相位裕度为60.7°,系统稳定且符合预先设计的算法输出角度,即本文所设定的60°的相位裕度。相较于改进策略,该策略进一步提高其在低频段的幅值增益,且其参数计算更高效、灵活。

电网阻抗在线检测技术所获取的电网电感值存在(−20%,+20%)的测量误差,图19表明即使在电网电感参数存在偏差的情况下,本研究提出的基于遗传算法的自适应优化方法仍能确保系统稳定运行。

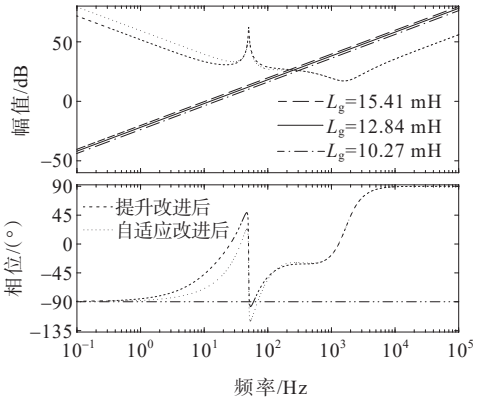


图 19 并网逆变器自适应改进控制策略前、后等效输出阻抗bode图

Figure 19 Bode plot of equivalent output impedance before and after adaptive improved control strategy of grid-connected inverter

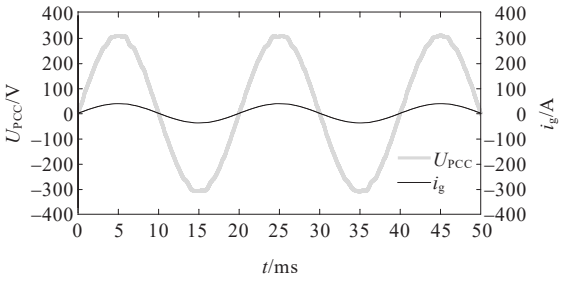
3 自适应改进策略仿真与试验验证

3.1 仿真验证

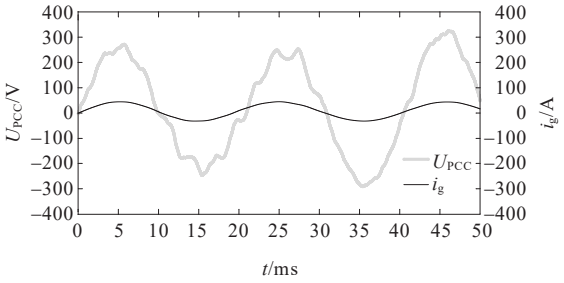
为验证遗传算法对在前馈通道上添加二阶低通滤波器的参数进行自适应优化的策略,在MATLAB/Simulink平台建立了6 kW单相LCL型并网逆变器仿真模型进行验证研究。为充分评估控制性能,将电网电感为2.56 mH(I_{SCR}=10)以及12.84 mH(I_{SCR}=2)两种情况进行对比,分析其并网电流与并网电压的总畸变率,与本文所提理论相互验证,证明其在极弱电网环境下所提策略的有效性,并网逆变器传统控制策略仿真如图20所示。

从图20中可以看出,当采用传统的网压比例前馈策略对并网逆变器输出波形进行傅里叶分析时,若电网电感为2.56 mH,并网逆变器系统仍然具有良好的稳定性,系统的并网电流谐波含量为0.65%,并网电压的谐波含量为1.15%;若电网电感为12.84 mH,并网电流与并网电压发生了明显的畸变,其电流谐波含量由0.65%变为5.93%,电压谐波含量由1.15%变为9.89%,不满足谐波含量小于5%的并网要求。

自适应改进控制策略仿真如图21所示。从图21中可以看出,电网电感分别为2.56和12.86 mH时系统的电网电流与电压均未发生明显的畸变。尤其当电网电感为12.86 mH时,系统电流与电压明显改善。采用傅里叶谐波分析法对这些仿真波形进行谐波分析。经分析发现,当电网电感为2.56 mH时,并网电流的谐波含量分别由0.65%变为0.57%,并网电压谐波含量由1.15%变为



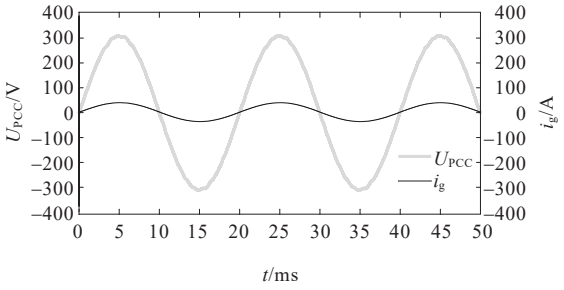
(a) L_g=2.56 mH



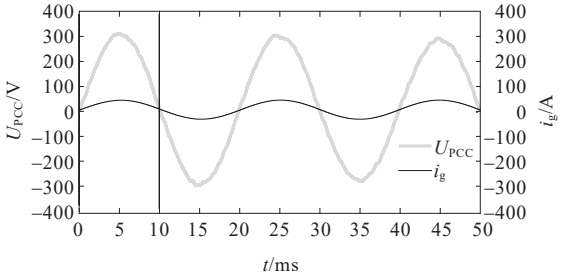
(b) L_g=12.84 mH

图 20　并网逆变器传统控制策略仿真

Figure 20　Simulation of traditional control strategy of grid-connected inverter



(a) L_g=2.56 mH



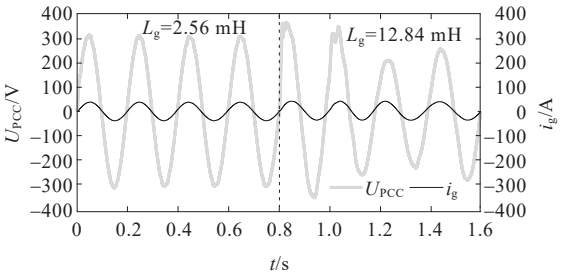
(b) L_g=12.84 mH

图 21　自适应改进控制策略仿真

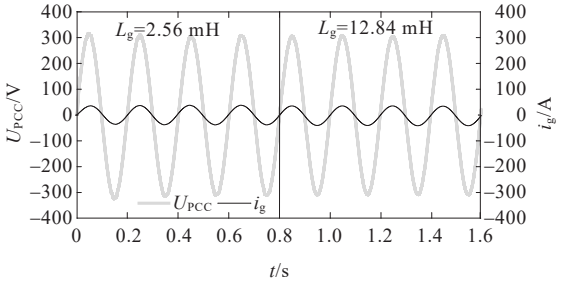
Figure 21　Simulation of adaptive improved control strategy

0.81%；当电网电感为 12.86 mH 时，并网电流的谐波含量由 5.93% 变为 2.98%，并网电压谐波含量由 9.89% 变为 2.29%，均满足谐波含量小于 5% 的并网要求。

阻抗仿真如图 22 所示。从图 22(a)中还可以看出，当电网电感发生突变时，采用传统策略的并网



(a) 传统策略



(b) 自适应策略

图 22　阻抗变化仿真

Figure 22　Simulation of impedance variation

逆变器无法输出满足并网要求的电网电压与电流波形；在高电感的情况下，电压、电流波形均发生了畸变。从图 22(b)中还可以看出，当电网阻抗发生突变时，采用自适应改进控制策略的并网逆变器仍可输出稳定的并网电流与并网电压波形。

在不同的电网电感条件下，本文所提自适应改进策略均可符合并网要求，验证了所提策略的有效性。

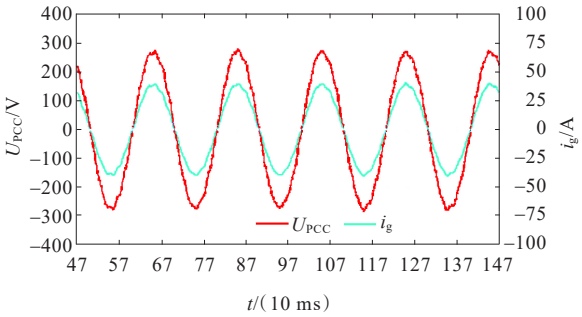
3.2　试验验证

为验证所提出的基于遗传算法优化的自适应二阶滤波器控制策略的工程实用性，本研究依托 RTU-BOX204 试验控制平台（其系统架构如图 23 所示），构建额定功率 6 kW 的单相 LCL 型并网逆变器试验系统（拓扑结构如图 1 所示）。该系统关键元器件参数与前文一致。L_g=2.56 mH 时的 LCL 并网逆变器试验的电流与电压波形、L_g=12.84 mH 时的 LCL 并网逆变器电流与电压波形与不同电网电感下自适应策略到传统控制策略的电流与电压波形分别如图 24～26 所示。L_g=12.84 mH 时的 LCL 并网逆变器自适应改进策略的满载变半载与半载变满载的电流与电压波形分别如图 27 所示。

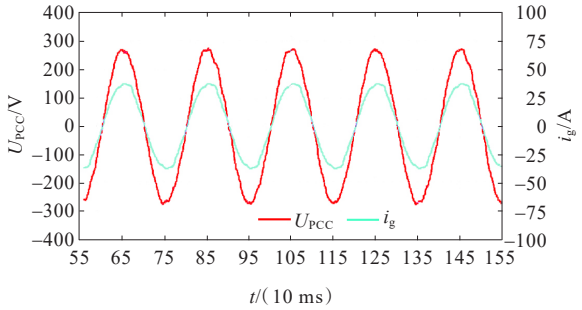
从图 24 中可以看出，当电网电感较低时即电网电感为 2.56 mH（I_{SCR}=10）时，传统网压前馈策略与自适应改进策略均可输出良好的并网电流与

图 23 RTU-BOX204 的试验控制平台

Figure 23 Experimental control platform of RTU-BOX204



(a) 传统控制策略

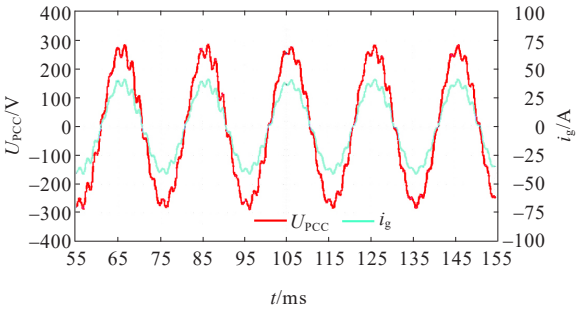


(b) 自适应控制策略

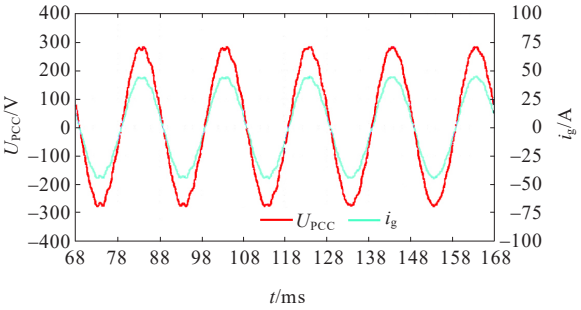
图 24 L_g=2.56 mH 时的 LCL 并网逆变器电流与电压波形

Figure 24 Current and voltage waveforms of LCL grid-connected inverter when L_g=2.56 mH

并网电压，此时的并网电流与并网电压的波形均为稳定状态且均未发生明显的畸变，系统的输出电流与输出电压可以进行并网。从图 25 中可以看出，当电网电感较高时即电网电感为 12.84 mH (I_{SCR}=2)时，若采用传统控制策略，此时的并网逆变器输出电压与电流出现畸变以及大量的谐波，输出电压与电流总谐波畸变率难以满足并网要求；若采用自适应改进策略，此时的并网逆变器可以输出稳定的电压与电流波形且波形良好，符合并网逆变器并网要求。



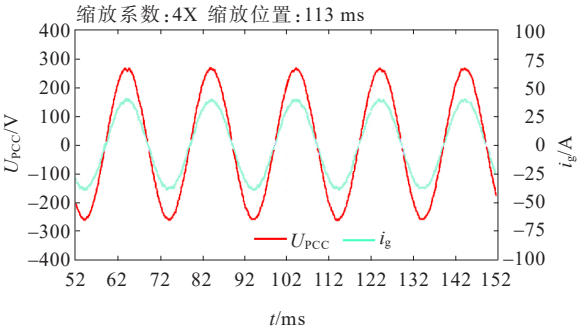
(a) 传统控制策略



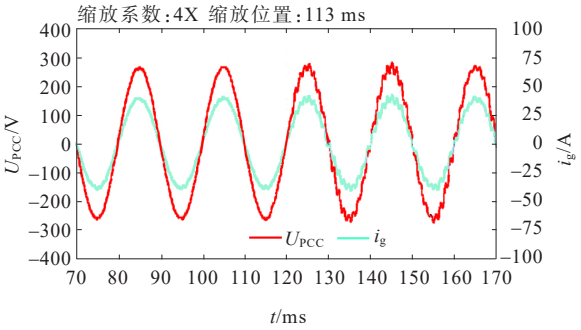
(b) 自适应控制策略

图 25 L_g=12.84 mH 时 LCL 并网逆变器电流与电压波形

Figure 25 Current and voltage waveforms of LCL grid-connected inverter when L_g=12.84 mH



(a) L_g=2.56 mH

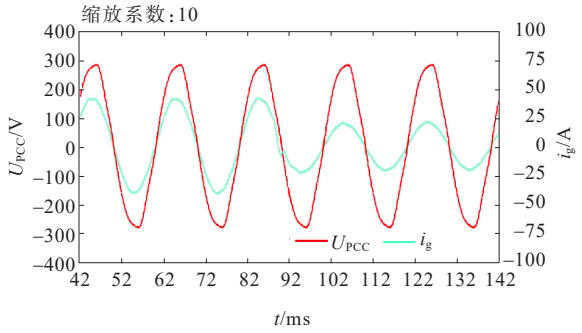


(b) L_g=12.84 mH

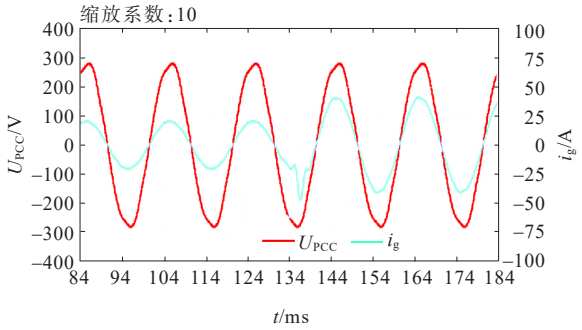
图 26 不同电网电感下自适应策略到传统控制策略的电流与电压波形

Figure 26 Current and voltage waveforms from adaptive strategies to traditional control strategies with different grid inductances

从图 26 中可以看出，当电网电感为低电感即 L_g=2.56 mH 时，并网逆变器的控制策略由自适应改进控制策略变为传统控制策略，并网逆变器输出电压、电流波形均未发生畸变，可以输出较高质量的电流、电压波形；当电网电感为高电感即 L_g=12.84 mH 时，并网逆变器在自适应改进控制策略下依然可以输出稳定的电流、电压波形；但在传统的控制策略下，并网逆变器输出波形出现明显的畸变与谐波，难以满足并网要求。



（a）缩放位置为−49.7 ms



（b）缩放位置：114 ms

图 27　L_g=12.84 mH 时 LCL 并网逆变器自适应改进策略半载变满载试验波形

Figure 27　Experimental waveforms of LCL grid-connected inverter's adaptive improvement strategy from half load to full load when L_g=12.84 mH

从图 27 中可以看出，在负载突变情况下，采用本文设计的基于二阶低通滤波器的自适应改进方案，系统输出波形仍能保持优良的动态性能，其谐波抑制效果与动态响应速度均能满足并网运行的技术要求。

在极弱电网工况下，仿真与试验数据的对比研究均证实，本文提出的基于遗传算法的自适应改进控制策略能够显著增强并网逆变器的相位裕度，进而有效提升系统的稳定性能。同时，该策略还明显拓宽了系统对电网阻抗变化的适应能力范围。

4　结语

1）阻抗分析结果表明，在极弱电网工况下，网压比例前馈环节在电网阻抗显著增大情况下会严重降低系统相位裕度，进而引发系统稳定性问题。

2）针对网压比例前馈引起的失稳问题，本文提出在前馈通路中引入二阶低通滤波器，其可抑制网压比例前馈的负面作用，维持对低频增益的提升作用。

3）针对电网阻抗的动态变化特性和 LCL 滤波器参数设计的非线性优化问题，本文提出了一种融合在线阻抗检测技术和遗传算法的自适应参数整定策略，有效提升了控制器参数设计的精度和工程实用性。

4）仿真与试验验证均表明，基于二阶低通滤波器的遗传算法自适应优化策略能有效提升系统在阻抗波动情况下的稳定性，显著增强其阻抗适应能力。

参考文献：

[1]　SMADI I A, BANY FAWAZ B H. DC offset rejection in a frequency-fixed second-order generalized integrator-based phase-locked loop for single-phase grid-connected applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 1.

[2]　肖宁，汤赐，邝栩仪，等. 计及频率耦合的单相并网逆变器阻抗建模及稳定性分析[J]. 电力科学与技术学报，2024, 39(1): 251-259.
XIAO Ning, TANG Ci, KUANG Xuyi, et al. Impedance modeling and stability analysis of single-phase grid-connected inverter considering frequency coupling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 251-259.

[3]　常继凯，舒勤，李鸿鑫，等. 计及电缆分布电容的并网逆变器谐振特性与抑制[J]. 电力科学与技术学报，2023, 38(3): 114-123.
CHANG Jikai, SHU Qin, LI Hongxin, et al. Resonance characteristics and suppression of grid-connected inverter system considering cable distributed capacitance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 114-123.

[4]　钟启迪，卢亚军，李翼翔，等. 基于哈密顿原理的新能源并网逆变器小信号等值建模方法[J]. 武汉大学学报(工学版)，2023, 56(1): 114-121.
ZHONG Qidi, LU Yajun, LI Yixiang, et al. Small-signal equivalent modeling method for new energy grid-connected inverters based on Hamilton's principle[J].

Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(1): 114-121.

[5] 沈姝衡,方天治,章益凡. 高带宽数字控制LCL型并网逆变器及其提高并网系统鲁棒性的谐振抑制技术研究[J]. 电工技术学报,2022,37(21): 5548-5561.
SHEN Shuheng, FANG Tianzhi, ZHANG Yifan. A high-bandwidth digital-control LCL-type grid-tied inverter and resonance-suppressing technique for improving the robustness of grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(21): 5548-5561.

[6] 方健,李辉. 基于状态重构准谐振扩张状态观测器的LCL型并网逆变器电流控制策略研究[J]. 发电技术,2024,45(1): 170-179.
FANG Jian, LI Hui. Research on current control strategy of the LCL-type grid-connected inverter based on state reconfiguration with quasi resonant-extended state observer[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 170-179.

[7] 周锦涛,张慧,谢杰,等. 基于特征谐波线性相移PWM的并网逆变器特定间谐波抑制方法[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(9): 947-957.
ZHOU Jintao, ZHANG Hui, XIE Jie, et al. Specific inter-harmonic suppression method for grid-connected inverters based on linear phase shift PWM of characteristic harmonic[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(9): 947-957.

[8] 李玉龙,杨明,杨倬,等. 抑制谐波谐振的并网逆变器机侧电流反馈的CVFAD设计方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(18): 125-136.
LI Yulong, YANG Ming, YANG Zhuo, et al. Design method for CVFAD of grid-connected inverter inverter-side current feedback with harmonic resonance suppression[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(18): 125-136.

[9] 戴炜,苟家波,李胜,等. 基于变量梯度法的下垂控制逆变器暂态稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(9): 966-972.
DAI Wei, GOU Jiabo, LI Sheng, et al. Transient stability analysis of droop control inverters based on variable gradient method[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(9): 966-972.

[10] WANG G N, DU X, SHI Y, et al. Effects on oscillation mechanism and design of grid-voltage feedforward in grid-tied converter under weak grid[J]. IET Power Electronics,2019,12(5): 1094-1101.

[11] 王翰文,曾成碧,苗虹. 基于多谐振电网电压前馈的并网逆变器相位补偿算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18): 81-89.
WANG Hanwen, ZENG Chengbi, MIAO Hong. A phase compensation algorithm of a grid-connected inverter based on a feedforward multi-resonant grid voltage[J]. Power System Protection and Control,2021,49(18): 81-89.

[12] 李小腾,刘瑶,胡晨琪,等. 基于超前因子的并网变流器电网电压前馈策略[J]. 智慧电力,2024,52(12): 88-95.
LI Xiaoteng, LIU Yao, HU Chenqi, et al. Leading factor based grid voltage feedforward strategy for gridconnected converter[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 88-95.

[13] 涂春鸣,邹凯星,高家元,等. 基于不对称正负反馈效应的PQ功率控制并网逆变器稳定性分析[J]. 电工技术学报,2023,38(2): 496-509.
TU Chunming, ZOU Kaixing, GAO Jiayuan, et al. Stability analysis of grid-connected inverter under PQ power control based on asymmetric positive-negative-feedback effects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(2): 496-509.

[14] 郑晨,周林,解宝,等. 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(19): 85-96.
ZHENG Chen, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016, 31(19): 85-96.

[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): 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.

[16] 丁劲松,姚鸿德,李圣清. 弱电网下LCL型并网逆变器输出阻抗复合重塑策略[J]. 电网与清洁能源,2024,40(3): 32-40.
DING Jinsong, YAO Hongde, LI Shengqing. A study on the complex remodeling strategy of output impedance of LCL-type grid-connected inverters under weak grids[J]. Power System and Clean Energy,2024,40(3): 32-40.

[17] 徐飞,汤雨,谷伟. 弱电网条件下LCL型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18): 4970-4979+5122.
XU Fei, TANG Yu, GU Wei. Resonant feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(18): 4970-4979+5122.

[18] 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.

[19] 吴云亚,谢少军,阚加荣,等. 逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6): 54-60+9.
WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current feedback for LCL grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(6): 54-60+9.

[20] 段晓宁,李萍,赵峰,等. 弱电网下基于电容电压全前馈的LCL型并网逆变器稳定性控制[J]. 高电压技术,2022,48(6): 2140-2151.
DUAN Xiaoning, LI Ping, ZHAO Feng, et al. Stability control of LCL-type grid-connected inverter based on capacitor voltage full feedforward under weak grid condition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2140-2151.

[21] HE Y Y, WANG X H, RUAN X B, et al. Hybrid active damping combining capacitor current feedback and point of common coupling voltage feedforward for LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(2): 2373-2383.

[22] 苗丽芳,王乐媛,曹斌,等. 弱电网下电网电压前馈控制分布式逆变系统的谐振阻尼特性分析[J]. 高电压技术,2020,46(10): 3521-3532.
MIAO Lifang, WANG Yueyuan, CAO Bin, et al. Resonance damping characteristic analysis of distributed inverter-based system with grid voltage feed-forward control in weak grid[J]. High Voltage Engineering,2020, 46(10): 3521-3532.

[23] 杨葆鑫,邢文奇,刘鹏飞,等. 基于直流电压前馈的构网型光伏稳定性优化控制策略[J]. 高压电器,2024,60(12): 213-222.
YANG Baoxin, XING Wenqi, LIU Pengfei, et al. Optimal control strategy of stability for grid-forming photovoltaic based on DC voltage feedforward[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(12): 213-222.

[24] 杨兴武,王涛,徐依明,等. 基于虚拟电感的LCL型并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 太阳能学报,2020,41(11): 56-63.
YANG Xingwu, WANG Tao, XU Yiming, et al. Voltage feedforward control of lcl grid-connected inverter based on virtual inductor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2020, 41(11): 56-63.

[25] 李君卫,汤亚芳,张尚然. 弱电网下LCL换流器谐振的自适应抑制研究[J]. 电测与仪表,2023,60(2): 172-179.
LI Junwei, TANG Yafang, ZHANG Shangran. Research on adaptive suppression of LCL converter resonance under weak power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(2): 172-179.

[26] 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.

[27] 涂春鸣,高家元,赵晋斌,等. 弱电网下具有定稳定裕度的并网逆变器阻抗重塑分析与设计[J]. 电工技术学报,2020,35(6): 1327-1335.
TU Chunming, GAO Jiayuan, ZHAO Jinbin, et al. Analysis and design of grid-connected inverter impedance remodeling with fixed stability margin in weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(6): 1327-1335.

[28] 郑国超. 弱电网下并网逆变器复合多谐振前馈控制研究[D]. 广州:广东工业大学,2022.
ZHENG Guochao. Research on compound multi-resonance feedforward control of grid-connected inverter in weak power grid[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2022.

[29] 马明,廖鹏,蔡雨希,等. LCL并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):174-182.
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. First-order active disturbance rejection control and parameter tuning method based on particle swarm optimization for LCL grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):174-182.