DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.88 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于控制参数域的并网逆变器锁相环参数快速设计

张华赢[1]，汪 清[1](中国电源学会会员)，郑宇婷[2](中国电源学会学生会员)，
肖 凡[2](中国电源学会会员)，郭 祺[2](中国电源学会会员)
(1.南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司)，深圳 518020；
2.国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学)，长沙 410082)

摘要：传统基于幅值裕度GM (gain margin)、相角裕度PM (phase margin)的锁相环PLL(phase-locked loop)参数设计方法，所得PLL带宽通常较低，往往以牺牲PLL动态特性的方式来保证系统的稳定性。此外，仅由GM和PM难以得到并网逆变器GCI(grid-connected inverter)系统的极限输出功率，输出电流上限往往需要仿真或者实验反复试凑才能确定。为了解决上述问题，提出了基于运行冗余量的PLL参数设计方法。该方法通过建立考虑电流环和PLL动态的GCI系统小信号模型，得到了可以表征系统特性的复矢量开环传递函数，刻画了系统不同工作变量下的三维控制参数域，并分析了系统电流、电压对控制参数取值的影响；最后通过仿真与实验验证了所提参数设计方法的有效性与正确性。

关键词：并网逆变器；锁相环；参数设计；稳定性分析

Fast Parameter Design Method of Phase-locked Loop for Grid-connected Inverters Based on Parameter Feasible Area

ZHANG Huaying[1], WANG Qing[1], *Member*, *CPSS*, ZHENG Yuting[2], *Student Member*, *CPSS*,
XIAO Fan[2], *Member*, *CPSS*, GUO Qi[2], *Member*, *CPSS*
(1. New Smart City High-quality Power Supply Joint Laboratory of China Southern Power Grid, Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518020, China; 2. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The traditional parameter design methods based on gain margin (GM) and phase margin (PM) usually result in a low bandwidth of the phase-locked loop (PLL). This means that the fast dynamic of the PLL is sacrificed to improve system stability. Furthermore, the values of GM and PM are of only minor help in determining the maximum available power of a grid-connected inverter (GCI) system. Determining the maximum available power often requires complex multiple simulations or experiments. An operation-margin-based PLL parameter design method is proposed to solve the above problems. A small-signal model of GCI system considering the dynamic characteristics of current loop and PLL dynamics is established. Then, an open-loop transfer function model in complex vector form that can characterize the system is obtained. Based on this model, the three-dimensional control parameter domain under different operating point variables is plotted and the influences of output current and grid voltage on the value of control parameter are analyzed. Finally, the simulations and experiments verify the effectiveness and correctness of the proposed control parameter design method.

Keywords: Grid-connected inverter (GCI); phase-locked loop (PLL); parameter design; stability analysis

收稿日期：2024-05-17；**修回日期**：2024-06-24；**录用日期**：2024-07-06；**网络首发日期**：2024-07-24
基金项目：南方电网公司科技资助项目(090000KK52222153)
This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid under the grant 090000KK52222153

随着我国“双碳”和以新能源为主体的“新型电力系统”等战略目标的提出，分布式发电技术迅速发展，高比例新能源成为电力系统发展的重要趋势和关键特征[1-2]。并网逆变器GCI (grid-connected

inverter)是连接新能源与电网的重要接口[3-5]，而锁相环 PLL(phase-locked loop)是 GCI 的重要控制环节，对系统的稳定性具有重要影响[6]。同步坐标系锁相环 SRF-PLL(synchronous reference framephase-locked loop)结构简单，广泛应用于 GCI 系统，但其抗干扰能力有限。为了弥补 SRF-PLL 的不足，国内外学者开展了大量研究，主要包括改进控制环节结构与参数优化等手段。

在 PLL 结构改进方面，国内外学者主要通过改变 PLL 的结构或加装其他环节来提升其性能。文献[7-8]在 PLL 中采用二阶广义积分器；文献[9]在 PLL 中接入自适应带通滤波器和移动平均滤波器；文献[10]提出了一种基于一阶线性自抗扰控制器的 PLL，但在受到扰动的动态过程中会引起较大的超调；文献[11-12]构建了一种惯性 PLL，但是由于缺少比例积分 PI(proportional integral)控制器，当电网频率偏离额定频率时，PLL 所得的相位与实际电网相位之间存在误差；文献[13]通过对系统输出阻抗进行重塑和相位校正，提出了一种以并网点电压、并网点电流为输入信号的新型 PLL 控制结构。上述改进控制使得 PLL 在准确性、稳定性方面有一定提升，但使得 PLL 结构更加复杂，且新增环节也带来了新的控制问题。

在 PLL 参数优化设计方面，文献[14]考虑到复数滤波器结构与 PLL 之间的交互影响，按照 PLL 的带宽频率要大于复数滤波器的带宽频率的原则设计 PLL 参数；文献[15]提出了一种 PLL 的全频域参数设计方法，但 PLL 参数和电流环的控制参数之间存在强耦合，增加了系统设计的复杂性；文献[16]根据谐波抗扰能力及相位裕度 PM (phase margin)等限制条件得到了参数的约束域；文献[17]考虑了电流环与 PLL 耦合，基于幅值裕度 GM (gain margin)和 PM 设计 PLL 参数；文献[18]重构 GCI 稳定性判别矩阵，使其成为奇异矩阵，再基于矩阵非零特征值，建立 GM 域 PLL 参数的关系，据此得到保证系统稳定性的 PLL 参数范围。上述参数设计方法虽然在一定程度上提高了系统的稳定性，但牺牲了 PLL 带宽。此外，通常使用 GM 或 PM 保证系统稳定裕量，但是稳定裕量与系统极限输出关系难以确定，往往需要实验或者仿真才能得到稳定边界。

基于此，本文构建了 GCI 系统小信号模型，得到了系统的复矢量传递函数，并通过奈奎斯特曲线分析了系统不同控制参数下的系统稳定性，刻画了系统的三维控制参数域，根据系统冗余量确定 PLL 参数，并归纳系统运行工况对 PLL 参数取值影响的变化规律。最后，通过仿真与实验验证理论分析的准确性与有效性。

1　GCI 数学模型构建

1.1　逆变器及 PLL 结构

GCI 的控制结构及电路拓扑如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流侧电压；L_f 为逆变器侧滤波电感；L_g 为电网电感；U_g 为交流侧无穷大电网；$\boldsymbol{U}_e$ 为逆变器输出电压矢量；$\boldsymbol{U}_{Lt}$ 为公共耦合点电压；$\boldsymbol{i}_g$ 为电网电流矢量；$\boldsymbol{i}_{gr}$ 为电网电流参考值矢量；i_{dr}、i_{qr} 分别为电网电流 dq 轴分量参考值。

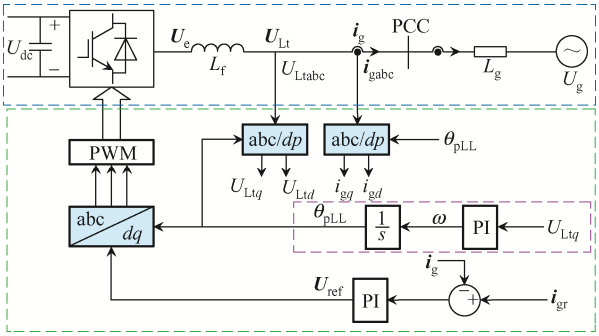


图 1　GCI 控制结构

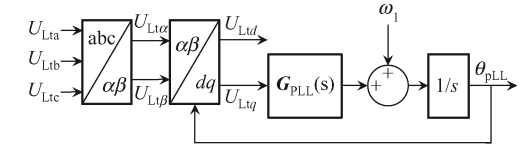
Fig. 1 Control structure of the GCI

本文逆变器采用电流环控制，表达式为

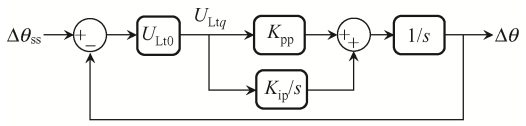
$$\begin{cases}\boldsymbol{U}_{ref}=\boldsymbol{G}_c(s)(\boldsymbol{i}_{gdqr}-\boldsymbol{i}_g)\\ \boldsymbol{U}_e=\boldsymbol{U}_{ref}\boldsymbol{G}_{de}(s)\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{ref}$ 为电流环输出电压矢量；$\boldsymbol{G}_c$ 为电流环 PI 控制器，$\boldsymbol{G}_c(s)=K_{pc}+K_{ic}/s$，$K_{pc}$、$K_{ic}$ 分别为电流环比例增益和积分增益，$K_{pc}=2\pi f_{ci}L_f$、$K_{ic}=0.2\pi f_{ci}K_{pc}$，$f_{ci}$ 为电流环截止频率；$\boldsymbol{G}_{de}(s)$为延迟环节，$\boldsymbol{G}_{de}(s)\approx\dfrac{1-0.75sT_s}{1+0.75sT_s}$，$T_s=1/f_s$，$f_s$ 为开关频率；$\boldsymbol{i}_{gdqr}$ 为 dq 轴下的电网电流参考值矢量。

本文使用 SRF-PLL，其 PLL 控制结构如图 2 所示，其中 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLL}}(\mathrm{s})=K_{\mathrm{pp}}+K_{\mathrm{ip}}/s$ 为 PLL 控制器，K_{pp}、K_{ip} 分别为 PLL 控制器比例增益与积分增益，ω_1 为额定角频率，U_{Lt0} 为公共连接点 PCC(point of common coupling)的电压稳态值，θ_{pLL} 为 PLL 输出角，θ_{ss} 为 PCC 的电压实际相位角。



(a) PLL结构



(b) PLL线性化模型

图 2 PLL 控制结构

Fig. 2 Control structure of the PLL

为了能同时分析 PLL 控制器比例增益与积分增益，本文选择 PLL 开环截止频率 f_{cp} 进行参数设计。根据开环截止频率的定义，开环截止频率处的幅值增益等于 1，由此推导出 PLL 的开环截止频率与 K_{pp}、K_{ip} 之间的关系为

$$\begin{cases} K_{\mathrm{pp}}=\dfrac{1}{2\pi f_{\mathrm{cp}}}\sqrt{\dfrac{U_{\mathrm{Lt0}}^2+U_{\mathrm{Lt0}}\sqrt{U_{\mathrm{Lt0}}^2+4a^2}}{2}} \\ K_{\mathrm{ip}}=\dfrac{a}{(2\pi f_{\mathrm{cp}})^2}\dfrac{U_{\mathrm{Lt0}}^2+U_{\mathrm{Lt0}}\sqrt{U_{\mathrm{Lt0}}^2+4a^2}}{2} \end{cases} \tag{2}$$

式中，$a=U_{\mathrm{Lt0}}/4\xi^2$，$\xi$ 为 PLL 阻尼比，本文取值为 $1/\sqrt{2}$，因此 $a=U_{\mathrm{Lt0}}/2$。

弱电网条件下，PCC 电压的波动导致 PLL 动态变化，因此 PLL 输出角 θ_{pLL} 与 θ_{ss} 之间会存在偏差角 $\Delta\theta$，因此存在 2 个 dq 坐标系：θ_{pLL} 所在 dq 坐标系(dq^{c})、θ_{ss} 所在 dq 坐标系(dq^{s})。电气量 $\boldsymbol{x}$ 在“s”参考系中的工作点变量 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}$ 与“c”参考系中的工作点变量 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{c}}$ 之间的关系为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}^{\mathrm{c}}&=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Delta\theta}\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}=[\cos(\Delta\theta)-\mathrm{j}\sin(\Delta\theta)]\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}\approx\\&(1-\mathrm{j}\Delta\theta)\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}\end{aligned} \tag{3}$$

将式(3)进行小信号扰动，可得

$$\begin{aligned}&[(x_{d0}^{\mathrm{c}}+\Delta x_d^{\mathrm{c}})+\mathrm{j}(x_{q0}^{\mathrm{c}}+\Delta x_q^{\mathrm{c}})]=(1-\mathrm{j}\Delta\theta)[(x_{d0}^{\mathrm{s}}+\\&\Delta x_d^{\mathrm{s}})+\mathrm{j}(x_{q0}^{\mathrm{s}}+\Delta x_q^{\mathrm{s}})]\end{aligned} \tag{4}$$

式中：Δx_d^{c}、Δx_q^{c} 分别为 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{c}}$ 的 d、q 轴扰动量；x_{d0}^{c} 和 x_{q0}^{c} 分别为 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{c}}$ 的 d、q 轴稳态值；Δx_d^{s}、Δx_q^{s} 分别为 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}$ 的 d、q 轴扰动量；$\Delta x_{d0}^{\mathrm{s}}$、$\Delta x_{q0}^{\mathrm{s}}$ 分别为 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}$ 的 d、q 轴稳态值。

由式(4)可得到电气量 $\boldsymbol{x}$ 的小扰动量在不同坐标系下的关系式为

$$\Delta\boldsymbol{x}^{\mathrm{c}}=\Delta\boldsymbol{x}^{\mathrm{s}}-\mathrm{j}\boldsymbol{x}_0\Delta\theta \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{x}_0$ 为 $\boldsymbol{x}$ 的稳态值。同时，基于图 2(b)，得到 PLL 中的线性化关系式为

$$\Delta\theta=\frac{\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLL}}(s)}{s}\Delta U_{\mathrm{Lt}q}^{\mathrm{c}} \tag{6}$$

1.2 逆变器复矢量模型构建

本文构建了 GCI 系统的复矢量小信号模型，得到了系统的复矢量开环传递函数，用于系统的稳定性分析及 PLL 参数设计。

在电流环中，电气量小扰动之间的关系式为

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{c}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)(\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}dqr}^{\mathrm{c}}-\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{c}})\\ \Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{c}}=\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\end{cases} \tag{7}$$

在 PLL 中，电气量小扰动之间的关系式为

$$\boldsymbol{G}_{\theta}(s)=\frac{\Delta\theta}{\Delta U_{\mathrm{Lt}q}^{\mathrm{s}}}=\frac{\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLL}}(s)}{s+U_{\mathrm{Lt0}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLL}}(s)} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{G}_{\theta}(s)$ 为 PLL 的闭环传递函数。

式(8)用矢量形式可改写为

$$\Delta\theta=\boldsymbol{G}_{\theta}(s)\,\mathrm{Im}(\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}})=\boldsymbol{G}_{\theta}(s)\frac{\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}}-\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}*}}{2\mathrm{j}} \tag{9}$$

式中：$\mathrm{Im}(\cdot)$ 表示复矢量的虚部；*表示复矢量的共轭量。

在功率电路中，电气量小扰动之间关系式为

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{s}}=\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}}+(sL_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}\omega_1L_{\mathrm{f}})\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}=\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}}+\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}(s)\\ \Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}^{\mathrm{s}}=\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}+(sL_{\mathrm{g}}+\mathrm{j}\omega_1L_{\mathrm{g}})\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}=\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}+\Delta\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(s)\end{cases} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}(s)$ 为滤波阻抗矢量；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(s)$ 为电网阻抗矢量。

联立式(5)、式(7)~式(10)，并利用电流与 PCC 电压关系式消除 $\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lt}}$，可得

$$\Delta \boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}(s)\Delta \boldsymbol{i}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{s}}+\widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}(s)\Delta \boldsymbol{i}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{s}*}+\boldsymbol{B}(s)\Delta \boldsymbol{i}_{gdqr} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}(s)$、$\widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}(s)$和$\boldsymbol{B}(s)$分别为电流自身闭环反馈矢量、共轭电流反馈矢量和电流参考扰动反馈矢量，具体表示为

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}(s)=\dfrac{(\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)\boldsymbol{i}_{g0}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{e}0})\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)}{\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)}\dfrac{G_{\theta}(s)}{2}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(s)-\\ \qquad\dfrac{1}{\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}(s)\\ \widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}(s)=\left[-\dfrac{(\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}0}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{e}0})\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)}{\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)}\dfrac{G_{\theta}(s)}{2}\right]\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}^{*}(s)\\ \boldsymbol{B}(s)=\dfrac{\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)}{\boldsymbol{Z}_{\mathrm{f}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{de}}(s)\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}(s)}\end{cases}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{\mathrm{e}0}$为逆变器输出电压稳态值矢量；$\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}0}$为电网电流稳态值矢量。

为了进一步简化模型，忽略电流参考值扰动量，并将式(11)进行共轭计算，得到

$$\Delta \boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}*}=\frac{\widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}^{*}(s)}{1-\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}^{*}(s)}\Delta \boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{s}} \tag{12}$$

最后，将式(12)代入式(11)，得到 GCI 系统的复矢量开环传递函数为

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{cs}}(s)=-\frac{\widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}^{*}(s)\widehat{\boldsymbol{F}}_{\mathrm{c}}(s)}{1-\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}^{*}(s)}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}(s) \tag{13}$$

复矢量传递函数的稳定性判据为奈奎斯特定理，但与实传递函数不同的是，奈奎斯特图所刻画的是系统频率从−∞至+∞的曲线，而非仅仅是正频段曲线。得到 GCI 系统复矢量传递函数的奈奎斯特曲线后，分析其穿越(−1, 0)的次数，便可判断系统稳定性。

2　PLL 参数设计

2.1　考虑单一工作变量的 PLL 参数设计方法

文献[13]逐步增大 PLL、电流环控制数值，通过数值分析得到额定工况下f_{cp}-f_{ci}参数的稳定边界。为了保证系统稳定裕度，通过能源系统分析 ESAC (energy systems analysis consortium)准则设计 PM (如 PM=30°~60°)、GM(如 GM=6 dB)。但所得参数取值较小，且不同 PM、GM 所对应的 GCI 运行阈值需要通过仿真或者实验反复试凑才能确定。因此，若能在控制参数设计的同时得到系统的运行上限，可大大减少系统稳定性分析的工作量。通常并网系统会留有 20%~50%的额外裕量，即使过载运行也能保证系统的可靠性。该额外余量不仅代表系统的过载能力，也能代表系统额定工况下的稳定裕量，因此本文提出利用冗余量来表征系统稳定裕度的控制参数设计方法。本文刻画了系统不同冗余量下的控制参数边界及 GM=6 dB、PM=30° 时的 ESAC 参数边界，如图 3 所示，其中系统参数见表 1。

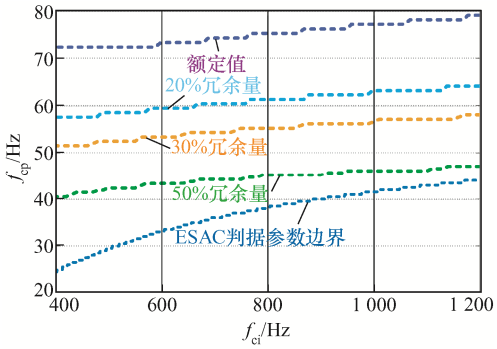


图 3　不同冗余量下的控制参数边界

Fig. 3 Parameter boundaries with different redundancies

表 1　GCI 变系统的参数

Tab. 1 Parameters of the GCI system

参数	数值
逆变器侧滤波电感 L_{f}/mH	2
电网侧电感 L_{g}/mH	3.7
电流 d 轴分量额定值 i_{gd}/A	120
直流侧电压 U_{dc}/V	800
电流 q 轴分量额定值 i_{gq0}/A	0
电网相电压 $U_{\mathrm{g}0}$/V	311
电网角频率 ω_1/(rad/s)	100p
开关频率 f_{s}/kHz	10

从图 3 中可知，随着系统冗余量的增加，其控制参数边界取值会减小，即使冗余量达到 50%，其对应的参数边界取值仍大于 ESAC 边界值。虽然，在不同冗余量所对应的工况下，其稳定边界控制参数值所留有的稳定裕度较小，但对额定工况即设计工况而言，所留有的冗余量则保证了系统的稳定裕度。因此，不使用 PM、GM 设计控制参数，而根据系统冗余量确定控制参数是可行的，既增大了

PLL 参数取值，又保证了系统的稳定裕度，还能确定系统的运行上限(冗余量对应的工作点为运行上限)。

对于单位功率运行的 GCI 系统，为了得到不同电流下的控制参数边界，图 4 刻画了 i_{gd}-f_{ci}-f_{cp} 三维参数图。X、Y 轴分别为 f_{cp}、f_{ci}，Z 轴为 d 轴电流 i_{gd}，将同一电流下的控制参数点连接起来便得到了该电流下的控制参数边界。需要注意的是，PCC 电压 $\boldsymbol{U}_{Lt}$ 会随有功电流的变化而变化，因此计算时式(2)中的 U_{Lt0} 不再是 1 个常数，而是该有功电流下 U_{Lt0} 的实际值。通过图 4 可一次性确定不同冗余量下的控制参数，得到控制参数取值。

2.2 考虑多工作变量的 PLL 参数设计方法

第 2.1 节中的方法虽然能得到不同有功电流下的控制参数域，但受三维图的限制，只能分析系统单位功率因数运行时的控制参数边界，当系统非单位功因数运行时，则不再适用。针对系统非单位功因数运行的情况，本节在单点参数域的基础上，提出了考虑多工作参数变量的 PLL 参数设计方法。

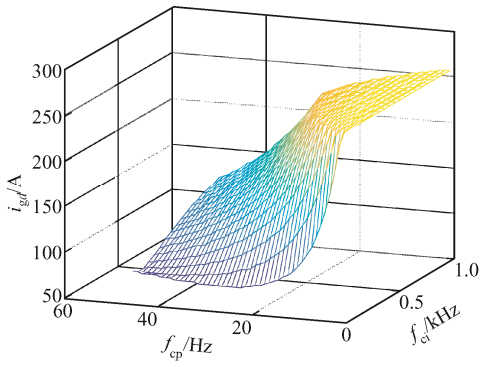


图 4 不同有功电流下的控制参数域

Fig. 4 Parameter boundaries under different active currents

由图 3 中的控制参数边界可知，每个电流环参数总存在 1 个对应的 PLL 参数上限值。所以在参数设计的过程中，如果先设计电流环参数 f_{ci}，则总会有 1 个合适的 PLL 参数 f_{cp} 使系统稳定，并且通过参数边界可以找到适配的最大值。但如果先设计 PLL 参数 f_{cp}，则通过参数域边界可得到多个适配的 f_{ci}，该设计顺序对于参数意义较小。鉴于设计 PLL 较复杂，因此先确定电流环参数，再进行 PLL 参数设计。

图 5 为考虑多工作变量的 PLL 参数设计流程，其步骤如下。

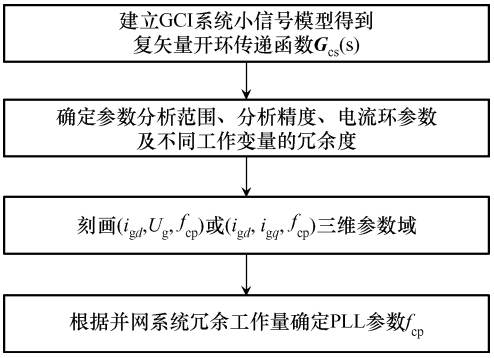


图 5 考虑多工作变量的 PLL 参数设计流程

Fig. 5 Design flow of PLL parameters considering multiple working point variables

第 1 步：建立 GCI 系统小信号模型，得到系统复矢量传递函数 $\boldsymbol{G}_{cs}(s)$。

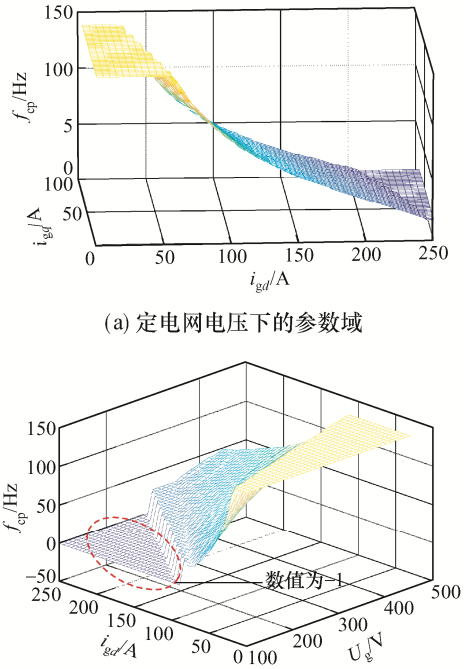
第 2 步：确定参数分析类型、分析范围、分析精度及不同工作变量所对应的冗余量。本文将电网电压的变化情况也考虑在内，由于有功部分是功率输出的主体，因此主要考虑无功电流-有功电流、有功电流-电网电压变化的情况。对于无功电流-电网电压的组合，虽然使用本文所提的方法可以进行研究，但未对其进行详细分析与论述。因此，工况分析主要包括(i_{gd}, U_g)、(i_{gd}, i_{gq})2 类。因此，需确定所分析的工况、分析范围、分析步长、运行冗余量及电流环截止频率。

第 3 步：刻画三维参数域。通过数值分析得到控制参数可行域，刻画(f_{cp}-i_{gd}-i_{gq})或(f_{cp}-i_{gd}-U_g)三维参数域，分析工作点对控制参数取值的影响。

第 4 步：确定 PLL 参数。在参数域上找到系统冗余量所对应的工作点，确定 f_{cp} 取值，然后将冗余量工作点的 U_{Lt0} 实际值及 f_{cp} 代入式(2)，得到 PLL 比例增益、积分增益数值，完成 GCI 系统 PLL 参数设计。

本文选取电流环参数 f_{ci}=1 000 Hz，所刻画(f_{cp}-i_{gd}-i_{gq})、(f_{cp}-i_{gd}-U_g)的三维参数域分别如图 6(a)、(b)所示。其中，系统相关参数见表 1，参数变量分析范围及分析步长见表 2。图 6(a)中 X、Y 轴分别

为并网电流 d、q 轴分量幅值，图 6 (b)中 X、Y 轴分别为并网电流 d 轴分量幅值和电网线电压，Z 轴均为系统在该组工作点参数下保持系统稳定运行的 f_{cp} 最大值。同样的，由于工作区间变化较大，式(2)中的 U_{Lt0} 不是 1 个常数，其数值随着工作点的变化而变化。



(a) 定电网电压下的参数域

(b) 定无功电流下的参数域

图 6　双工作变量三维参数域

Fig. 6 Three-dimensional parameter domains of dual working variables

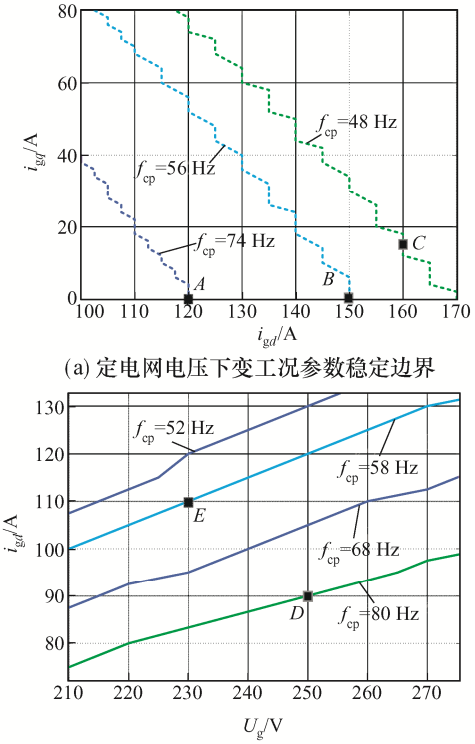
表 2　变工况下的参数分析范围

Tab. 2 Parameter analysis ranges under variable working points

变量		初始分析值	变化步长	分析上限
U_g=380 V	i_{gd}	0	5 A	250 A
	i_{gq}	0	2 A	80 A
	f_{cp}	20 Hz	2 Hz	150 Hz
i_{gq}=0 A	i_{gd}	0	5 A	250 A
	U_g	100 V	10 V	450 V
	f_{cp}	30 Hz	2 Hz	150 Hz

由图 6 可知，随着逆变器注入电流的增大(无论是有功电流还是无功电流)，并网系统的稳定性降低，需要通过降低 PLL 带宽实现系统的稳定运行；而电网电压的增大有利于提高并网系统的稳定性，提升 PLL 动态性能。此外，在图 6(b)中出现 f_{cp} 为负数的区域，因为该区域的工作点不满足电路关系式，不具有物理意义与工程研究价值，所以将该参数赋值为负数。

图 7(a)、(b)分别给出了图 6 中定无功电流、定无功电压下的 PLL 控制参数等高线图。图 7(a)中的 PLL 截止频率分别为 48、56、74 Hz；图 7(b)中的 PLL 截止频率分别为 52、58、68、80 Hz。图 7(a)中额定工作点为(120, 0)；电流环参数为 1 000 Hz 时所对应的最大 PLL 截止频率，值为 74 Hz；图 7(b)中额定工作点为(250, 90)；电流环参数为 1 000 Hz 时所对应的最大 PLL 截止频率，值为 80 Hz。



(a) 定电网电压下变工况参数稳定边界

(b) 恒无功电流下变工况参数边界

图 7　双工作变量下的参数边界

Fig. 7 Parameter bounds under dual working variables

在图 7(a)中，当取工作点(150, 0)所对应的 56 Hz 作为 PLL 控制参数时，有功电流保留 30 A 冗余量。当系统运行至 C 点时，系统难以稳定运行，因为在 C 点其 PLL 参数最大取值小于 56 Hz。取 56 Hz 作为 PLL 参数时，工作点(150, 0)的 PCC 电压 U_{Lt0} 的数值为 257.68 V，将 f_{cp}=56 Hz、U_{Lt0}=257.68 V 代入式(2)得到 K_{pp}=1.242 8、K_{ip}= 199.011 8。同样地，在图 7(b)中，取工作点(230, 110)所对应的

58 Hz 作为 PLL 参数时，系统在额定工况下能够稳定运行。选取 58 Hz 作为 PLL 参数时，工作点(230, 110)的 PCC 点电压 U_{Lt0} 的数值为 191.18 V，将 f_{cp}=58 Hz、U_{Lt0}=191.18 V 代入式(2)得到 K_{pp}=1.734 9、K_{ip}=287.733 1。由于电流环参数与工作点无关，将 f_{ci}=1 000 Hz、L_f=2 mH 代入 f_{ci}-PI 参数关系式中得到 K_{pc}=12.566 4、K_{ic}=7 895.680 0。

刻画三维参数域，既可以快速得到逆变器不同工况下的 PLL 参数最大值，又能够综合全面地反映运行工况对 PLL 参数取值的影响。此外，还能为 GCI 系统切换工况运行时的参数设计提供指导，对 GCI 系统的安全可靠运行具有重要意义。

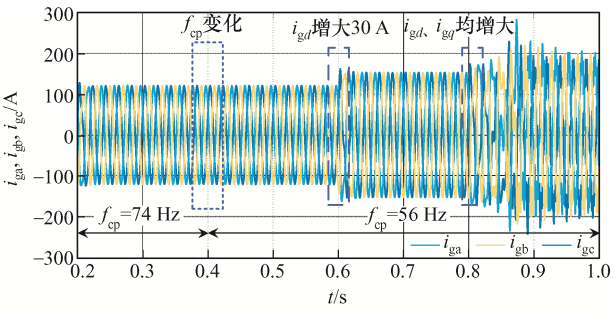
3 仿真与实验验证

3.1 仿真验证

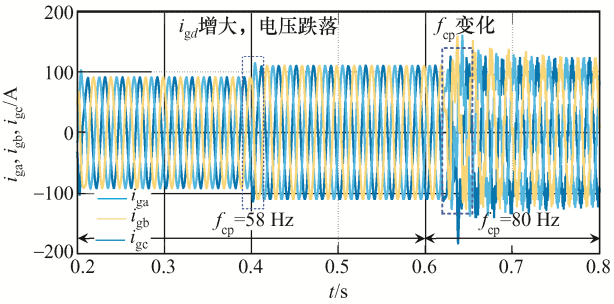
为了验证利用系统运行冗余量进行控制参数设计方法的有效性与准确性，选择图 7 中的观测点进行仿真验证。

在定电压情况下，在工作区间(i_{gd}, i_{gq})内选取了 A~C 3 个点作为观测点，如图 7 (a)所示。3 个点的坐标值分别为 A=(120, 0)、B=(150, 0)、C=(160, 16)。其中 A 点为额定工况，对应的最大 PLL 截止频率为 74 Hz，25%冗余量对应的最大 PLL 截止频率为 56 Hz。在工作区间(U_g, i_{gd})内选取了 D、E 2 个点作为观测点，2 个点的坐标值分别为 D=(250, 90)、E=(230, 110)。

图 8 给出了 2 种情况下的三相电流仿真波形。在图 8 (a)中，初始工作点为 A 点，在 t=0.4 s 之前 PLL 参数 f_{cp} 的数值为 74 Hz；在 t=0.4 s 时，f_{cp} 从 74 Hz 减小至 56 Hz，后面取值保持不变；在 t=0.6~0.8 s 时，有功电流增大，工作在图 7(a)所示的 B 点；在 t=0.8 s 时，有功电流、无功电流均增大，工作在 C 点，其他参数见表 1。在图 8(b)中，在 t=0.6 s 之前，PLL 参数 f_{cp} 数值为 58 Hz；在 t=0.6 s 时，f_{cp} 从 58 Hz 增大至 80 Hz。初始工作点为 D 点，在 t=0.4 s 时，有功电流增大、电网电压跌落，系统工作在图 7(b)中的 E 点。



(a) 定电网电压下三相电流仿真波形



(b) 定无功电流下三相电流仿真波形

图 8 观测点的三相电流仿真波形

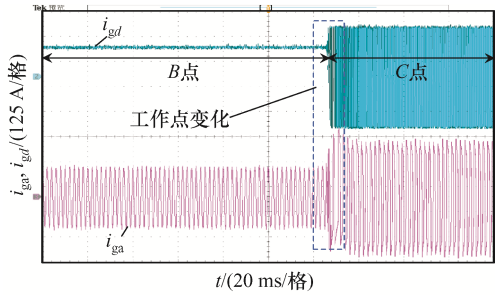
Fig. 8 Simulated waveforms of three-phase currents at observation points

图 7(a)中，当 f_{cp}=74 Hz 时，系统在额定工况下稳定运行；当控制参数为 56 Hz 时，系统在 B 点仍能保持可靠运行，而工作点由 B 点向 C 点迁移后，系统输出电流波形畸变，难以稳定运行。图 7(b)中，当 f_{cp}=58 Hz 时，系统在 D、E 点均能稳定运行，但控制参数切换后 GCI 系统失稳，仿真结果与理论分析一致。从图 8 可以看出，使用冗余量设计控制参数可以保证系统稳定裕度，只要系统在不超过冗余量的区间内运行，就能保证系统的稳定性。通过参数域可以快速确定系统在不同工况下 PLL 的取值阈值，同时使用冗余量确定控制参数可以在充分保证系统稳定裕度的前提下尽可能减小系统动态特性的牺牲程度。

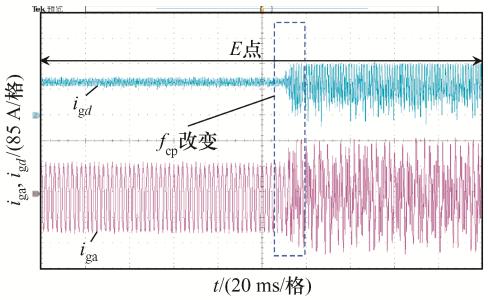
3.2 实验验证

在硬件在环实验平台中搭建了表 1 参数下的 GCI 系统，对所提控制参数设计方法的有效性进行验证，观测点如图 7 所示，实验参数与仿真参数一致。

电流实验波形如图 9 所示。在图 9(a)中，系统初始运行点为 *B* 点，PLL 参数为 *B* 点所对应的 56 Hz，运行一段时间后工作点迁移至 *C* 点，输出电流波形振荡，系统失稳。在图 9 (b)中，系统初始运行于 *E* 点，PLL 控制参数为 58 Hz，在 PLL 参数切换后，输出电流中谐波含量激增，系统难以安全运行。实验结果与理论分析结果一致，验证了所提参数设计方法的有效性。



(a) 定电网电压下实验波形



(b) 定无功电流下实验波形

图 9　观测点的实验电流波形

Fig. 9　Experimental waveforms of three-phase currents at observation points

4　结论

本文建立了 GCI 系统复矢量传递函数模型，刻画了包含工作点变量的 PLL 三维参数域，提出了使用冗余量进行 PLL 参数设计的方法，仿真与实验结果验证了所提方法的正确性，主要结论如下。

(1)本文所建模型可一次性得到系统不同有功电流下的稳定参数边界，以及非单位功率运行时的系统不同工作点的 PLL 参数最大值，在逆变器工作点变化时无需反复试凑。

(2)参数域可综合全面地反映工况对逆变器控制参数的影响，直观评估不同控制参数下 GCI 系统的稳定性，当 PLL 参数值超过其最大值时，系统难以稳定运行，克服了传统方法仅能显示特定工作点下系统稳定性的局限，且基于冗余量的控制参数设计能在一定程度上增加 PLL 带宽，提升 PLL 的动态性能。

(3)GCI 系统参数域的分析结果表明，电网输出电流与 PLL 参数呈负相关，电网电压与 PLL 参数呈正相关，合理选择控制参数对系统影响重大。

参考文献：

[1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
Xie Xiaorong, He Jingbo, Mao Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475. (in Chinese)

[2] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Zhang Zhigang, Guo Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(1): 1-8. (in Chinese)

[3] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12.
Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Tang Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 江周鹏, 郝武帮, 李琰. 多功能光伏并网逆变器优化控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 132-141.
Jiang Zhoupeng, Hao Wubang, Li Yan. Optimal control strategy for multi-functional grid-connected photovoltaic

inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 132-141. (in Chinese)

[6] 陈征, 胡鹏飞, 杨再欣, 等. 多场景下锁相环同步 VSC 暂态失稳边界研究[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 84-92.
Chen Zheng, Hu Pengfei, Yang Zaixin, et al. Transient instability boundary of PLL-synchronous VSC in multiple scenarios [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 84-92. (in Chinese)

[7] Luna A, Rocabert J, Candela J I, et al. Grid voltage synchronization for distributed generation systems under grid fault conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3414-3425.

[8] 石径, 杨军, 文龙, 等. 基于 SOGI 和 CDCCF 的复合前置滤波锁相环研究[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 237-246.
Shi Jing, Yang Jun, Wen Long, et al. Research on prefiltering phase-locked loop based on SOGI and CDCCF [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 237-246. (in Chinese)

[9] Sridharan K, Babu B C. A novel adaptive bandpass filter based PLL for grid synchronization under distorted grid conditions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9003111.

[10] 杨天翔, 程志江, 杨涵棣, 等. 基于自抗扰控制的风电并网变流器锁相环设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 147-155.
Yang Tianxiang, Cheng Zhijiang, Yang Handi, et al. Design of phase-locked loop of grid connected converter based on active disturbance rejection control [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(4): 147-155. (in Chinese)

[11] Li Gaoxiang, Chen Yandong, Luo An, et al. An inertia phase locked loop for suppressing sub-synchronous resonance of renewable energy generation system under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4621-4631.

[12] Li Gaoxiang, Bao Xiaoxu, Liu Xiao. A double-loop inertia phase-locked loop with antidisturbance ability [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(4): 5585-5592.

[13] 杨明, 杨倬, 李玉龙, 等. 高渗透率下基于并网逆变器阻抗重塑的锁相环设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 554-566.
Yang Ming, Yang Zhuo, Li Yulong, et al. A phase-locked loop design method based on impedance remodeling of grid-connected inverter under high permeability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 554-566. (in Chinese)

[14] Kim B H, Sul S K. Shaping of PWM converter admittance for stabilizing local electric power systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1452-1461.

[15] Zhu Donghai, Zhou Shiying, Zou Xudong, et al. Small-signal disturbance compensation control for LCL-type grid-connected converter in weak grid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2852-2861.

[16] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
Yan Peilei, Ge Xinglai, Wang Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221. (in Chinese)

[17] Li Xing, Lin Hua. A design method of phase-locked loop for grid-connected converters considering the influence of current loops in weak grid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2420-2429.

[18] Chen Yuhang, Ruan Xinbo, Lin Zhiheng, et al. A reconstructed singular return ratio matrix for optimizing design of the PLL in grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12453-12464.



张华赢

作者简介：

张华赢(1981—)，男，教授级高级工程师。研究方向：电能质量监测与治理技术。E-mail：zhyszpower@163.com。

汪清(1987—)，女，中国电源学会会员，高级工程师。研究方向：电能质量监测与治理技术。E-mail：csgwang@126.com。

郑宇婷(1999—)，女，中国电源学会学生会员，通信作者，博士研究生。研究方向：分布式发电与电力电子技术。E-mail：yt0107yt@hnu.edu.cn。

肖凡(1988—)，男，中国电源学会会员，讲师。研究方向：分布式发电与电力电子技术。E-mail：woliaokk123@126.com。

郭祺(1993—)，男，中国电源学会会员，副研究员。研究方向：电能质量监测与治理。E-mail：qguo_215@163.com。

(责任编辑：孙美菊)