

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519330

弱电网下基于电流环与锁相环耦合效应的 并网逆变器阻抗重塑控制策略^{*}

王震^{1,2} 杨明^{1,2} 孙抗^{1,2}

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室 焦作 454003)

摘要: 针对锁相环、电网阻抗与电流控制环之间的动态相互作用导致系统稳定性降低的问题,本文首先利用赫尔维兹判据进行分析,该分析方法能够揭示电网阻抗波动对锁相环同步过程稳定裕度的内在影响机制,并且分析结果表明电网阻抗是基于锁相环的同步系统中一个重要的不稳定因素。然后,提出了电网阻抗自适应协同锁相环控制结构。基于所提改进锁相环控制结构,对电流控制环串联补偿相位校正环节,重塑并网逆变器输出阻抗,从而显著增强并网系统在弱电网下的鲁棒性。最后仿真与实验结果证实了理论分析的准确性,表明了改进策略具有可行性。

关键词: 弱电网;并网逆变器;锁相环;相位补偿;赫尔维兹判据

中图分类号: TM464;TN78 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Grid-connected inverter impedance reshaping control strategy based on the coupling effect of current loop and phase-locked loop in the power grid

Wang Zhen^{1,2} Yang Ming^{1,2} Sun Hang^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control for Coal Mining Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: To address the issue of reduced system stability caused by the dynamic interaction between the phase-locked loop, grid impedance and current control loop, this paper first utilizes the Hurwitz criterion for analysis. This analytical method can reveal the inherent impact mechanism of grid impedance fluctuations on the stability margin of the phase-locked loop synchronization process, and the analysis results indicate that grid impedance is an important unstable factor in the phase-locked loop-based synchronization system. Then, a grid impedance adaptive collaborative phase-locked loop control structure is proposed. Based on the proposed improved phase-locked loop control structure, a phase correction link is added in series to the current control loop to reshape the output impedance of the grid-connected inverter, thereby significantly enhancing the robustness of the grid-connected system under weak grid conditions. Finally, simulation and experimental results confirm the accuracy of theoretical analysis, indicating the feasibility of the improved strategy.

Keywords: weak power grid; grid-connected inverter; phase-locked loop; phase compensation; Hurwitz criterion

0 引言

随着可再生能源发电技术的普及,以及分布式发电系统的规模持续增大,高渗透率新能源发电^[1-4]已成为一种必然的趋势。作为新能源并网系统的核心功率转换设备,并网逆变器的动态特性与运行稳定性直接决定了电力系统的电能质量。然而,随着大规模新能源发电渗透率提升,系统

逐渐呈现弱电网特征,导致并网逆变器的控制稳定性面临严峻挑战。电网的强弱程度可以通过短路比(short circuit ratio, SCR)来区分。一般来说,当SCR值在2~3之间时,电网被视为弱电网;而当SCR值低于2时,则被认为是极弱电网。

在弱电网条件下,锁相环(phase-locked loop, PLL)与电网阻抗动态交互影响会引发PLL输入信号畸变,导致公

收稿日期:2025-07-10

^{*} 基金项目:河南省科技攻关项目(252102241061)、国家自然科学基金(U1804143)、河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2025AL30)资助

共耦合点(point of common coupling, PCC)电压相位跟踪产生偏差,造成并网逆变器的同步失稳^[5-6],进而降低系统的控制稳定性与鲁棒性^[7]。其次,在考虑 PLL 的逆变器系统中,由于 PLL 引入的负阻抗效应,逆变器系统的输出阻抗特性(包括幅频和相频特性)会发生改变,降低了并网系统的稳定裕度。因此,深入分析和研究弱电网下锁相环引起的耦合问题是必要的。

针对上述问题,研究人员提出了多种分析方法和改进策略,可总结如下:1)在 PLL 前级串联附加滤波器:文献[8]通过构建基于复数滤波器结构锁相环的并网逆变器模型,提出一种阻抗重塑控制策略,增强弱电网下系统的稳定性与电网阻抗适应范围,但新型 PLL 参数设计与调优较为繁琐。2)优化 PLL 控制结构:文献[9]提出了一种导纳合成相量法来分析 PLL 和电网电压前馈对系统稳定性的共同影响,并通过引入带通滤波器来优化系统鲁棒性,但所提方法对导纳模型和参数标定依赖较大。文献[10-12]分别引入虚拟 PCC 与阻抗重塑技术以及基于虚拟外部干扰的并网逆变器阻抗测量方法,通过向 PCC 的电压和电流采样值中注入干扰来测量阻抗,而不需要实际的外部扰动源,但对系统阻抗模型的准确性和在线参数计算要求严格。文献[13]对传统 PI 控制在风电并网逆变器直流母线电压控制中的不足,提出采用二阶线性自抗扰控制进行改进,提升系统的抗扰能力,但高增益设计易引入测量噪声放大。3)消除并网逆变器的频率耦合效应:文献[14]提出了一种基于复数滤波器的对称锁相环方法,能够改善频率耦合抑制,但抑制范围有限。文献[15]在文献[14]提出的对称 PLL 结构基础上,将传统多输入多输出模型简化为单输入单输出模型,消除了频率耦合效应,但对称型 PLL 的设计与参数设计较为复杂。4)对输出阻抗重塑:文献[16]结合多目标约束条件与二阶电流校正环节,对逆变器输出阻抗进行重塑,提升了弱电网条件下的系统稳定性与功率传输特性,但目标优化与电流校正需多维参数进行在线迭代。文献[17-18]提出了一种基于新型锁相环结构的阻抗重塑方法,重塑了并网逆变器输出阻抗,提高了在高阻抗电网中的稳定性和适应性,但控制算法较为复杂,参数调试耗时。5)添加自适应控制:文献[19]提出一种适用于复杂电网环境的高精度锁相环设计,采用自适应带宽调节策略以增强系统对频率和相位扰动的跟踪能力,但极端谐波畸变场景下的稳定性尚待更多实验验证。

综上所述,尽管当前针对弱电网条件下的锁相环结构优化、输出阻抗重塑及控制策略改进已取得一定研究进展,但未充分解决系统鲁棒性降低的问题,弱电网下 PLL 与电网阻抗的交互影响仍须深入研究。因此,本文首先分析 PLL 与电网阻抗的耦合原理,揭示了电网阻抗变化时 PLL 稳定性下降的问题,在此基础上,改进锁相环和电流环结构,重塑系统输出阻抗,并给出新型系统具体参数设计方法。最后通过仿真和实验验证可行性和有效性。

1 弱电网下逆变器系统稳定性分析

1.1 LCL 滤波并网逆变器的数学模型

图 1 为单相 LCL 型并网逆变器工作原理图。其中, LCL 型滤波网络由逆变侧电感 L_1 、中间滤波电容 C 及电网侧电感 L_2 构成。系统中, u_{dc} 、 u_{PCC} 、 u_g 和 Z_g 分别为直流母线电压、PCC 处电压、电网侧电压和电网阻抗。电流变量方面, i_c 、 i_1 、 i_2 、 i_{ref} 和 I_2 分别为电容电流、机侧电流、并网电流、并网电流幅值和并网电流幅值。相角变量 θ 则由锁相环提取,用以表征 PCC 处的电压相位信息。

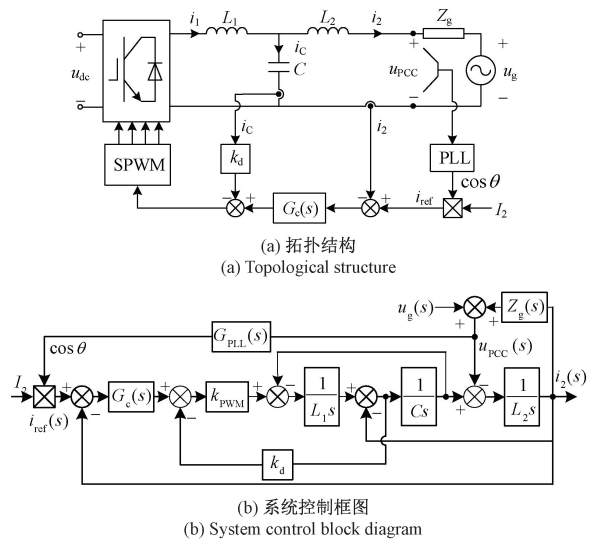


图 1 单相并网逆变器工作原理框图
Fig. 1 Diagram of the working principle of a single-phase grid-connected inverter

电流调节环节采用准比例谐振控制器^[20],其数学模型可表示为二阶传递函数形式:

$$G_c(s) = k_p + \frac{2\omega_c k_r s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: ω_0 、 ω_c 、 k_r 以及 k_p 分别为工频角频率、截止角频率、电容电流有源阻尼系数、比例增益和谐振增益。

图 2 为 SRF-PLL 工作原理示意图^[21],其控制环节传递函数为:

$$G_{PLL}(s) = \frac{0.5[k_{p-PLL}(s - j\omega_0) + k_{i-PLL}]}{(s - j\omega_0)^2 + U_{m1}[k_{p-PLL}(s - j\omega_0) + k_{i-PLL}]} \quad (2)$$

式中: U_{m1} 为 PCC 处电压的幅值, k_{p-PLL} 和 k_{i-PLL} 分别为 PLL 比例系数和积分系数。

对图 1 系统控制框图进行等效变换,可得图 3 所示变换后的控制框图、逆变器系统输出阻抗 $Z_o(s)$ 和 PLL 输出阻抗 $Z_{PLL}(s)$ 的表达式^[22]:

$$\begin{cases} Z_o(s) = \frac{1 + T_a(s)}{G_2(s)} \\ Z_{PLL}(s) = -\frac{1 + T_a(s)}{T_a(s)G_{PLL}(s)I_2} \end{cases} \quad (3)$$

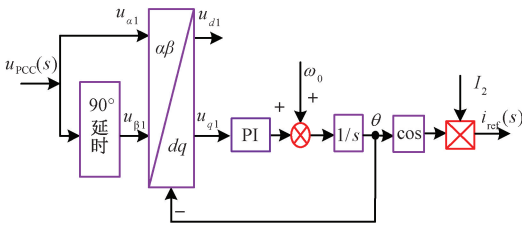


图2 SRF-PLL工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of SRF-PLL

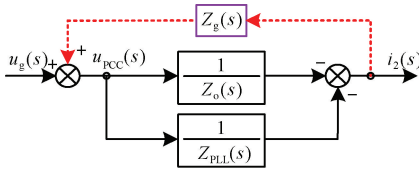


图3 系统控制框图等效变换

Fig. 3 Equivalent transformation of the system control block diagram

进而可得 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、系统环路增益 $T_a(s)$ 的表达式:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{k_{PWM}}{L_1 C s^2 + k_d k_{PWM} C s + 1} \\ G_2(s) = \frac{L_1 C s^2 + k_d k_{PWM} C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + k_d k_{PWM} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \\ T_a(s) = G_c(s) G_1(s) G_2(s) \end{cases} \quad (4)$$

$i_2(s)$ 到 $u_{PCC}(s)$ 的表达式为:

$$i_2(s) = -\left(\frac{1}{Z_o(s)} + \frac{1}{Z_{PLL}(s)}\right) \cdot u_{PCC}(s) = -\frac{1}{Z_{o-PLL}(s)} \cdot u_{PCC}(s) \quad (5)$$

1.2 弱电网下传统 PLL 稳定性分析

由图 1(a)可知,弱电网工况下 $u_{PCC}(s)$ 的表达式为:

$$u_{PCC}(s) = u_g(s) + sZ_g i_2(s) \quad (6)$$

结合式(6)和图2可得传统锁相环考虑电网阻抗时的正交输入信号 $u_{\alpha 1}$ 、 $u_{\beta 1}$ 为:

$$\begin{cases} u_{\alpha 1} = U_g \cos \theta_g - I_2 Z_g \omega_0 \sin \theta_2 \\ u_{\beta 1} = U_g \sin \theta_g + I_2 Z_g \omega_0 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)进行 $\alpha\beta-dq$ 坐标变换可得 u_{d1} 、 u_{q1} 为:

$$\begin{cases} u_{d1} = U_g \cos(\omega_{g1} t - \theta) - I_2 Z_g \omega \sin(\omega_2 t - \theta) \\ u_{q1} = U_g \sin(\omega_{g1} t - \theta) + I_2 Z_g \omega \cos(\omega_2 t - \theta) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_{g1} 、 ω_2 分别为电网电压 $u_g(s)$ 和并网电流 $i_2(s)$ 的角频率,并且有 $\omega_{g1} t = \theta_g$ 、 $\omega_2 t = \theta_2$ 。

考虑到并网电流 $i_2(s)$ 流经电网阻抗 Z_g 所产生的压降相较于电网电压占比并不大,因此为了简化电网阻抗与锁相环系统的耦合控制框图以及后续的失稳分析,忽略电网阻抗对并网点电压相位的影响,近似认为 $u_g(s)$ 相位 θ_g 与 $i_2(s)$ 相位 θ_2 一致,可得如下关系:

$$\begin{cases} \sin(\omega_{g1} t - \theta) = \sin(\theta_g - \theta) \approx \omega_{g1} t - \theta \\ \cos(\omega_{g1} t - \theta) = \cos(\theta_g - \theta) \approx 1 \\ \omega_2 t = \theta_2 = \theta \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得 u_{q1} 为:

$$u_{q1} \approx U_g(\omega_{g1} t - \theta) + I_2 Z_g \omega_0 \quad (10)$$

根据式(10)和图2可得如图4所示电网阻抗与锁相环的耦合控制结构框图^[23]。

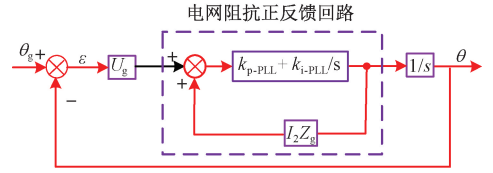


图4 电网阻抗与锁相环的耦合控制结构框图

Fig. 4 Block diagram of the coupling control structure of grid impedance and phase-locked loop

为了对电网阻抗与锁相环的耦合关系作进一步分析,首先根据图4所示控制框图求出 θ_g 与 θ 之间的闭环传递函数 $G_3(s)$ 为:

$$G_3(s) = U_g(k_{p-PLL} s + k_{i-PLL}) / [(1 - k_{p-PLL} I_2 Z_g) s^2 + (U_g k_{p-PLL} - k_{i-PLL} I_2 Z_g) s + U_g k_{i-PLL}] \quad (11)$$

对式(11)分析可知,闭环传递函数 $G_3(s)$ 的极点是否位于 s 的左半平面与电网阻抗 Z_g 的大小密切相关。当电网阻抗 Z_g 较大时 $G_3(s)$ 存在位于 s 右半平面的极点,此时将会造成锁相环控制系统失稳。

为了对锁相环控制系统稳定性受电网阻抗 Z_g 的影响程度作进一步的定量分析^[23],本节以 PLL 带宽 $f_{BW} = 250$ Hz 为例,结合参数设计准则,给出如表1所示基于新型锁相环控制的并网逆变器系统相关参数。

表1 逆变器参数

Table 1 Inverter parameters

参数	数值	参数	数值
逆变侧电 L_1 /mH	3	电网频率 f_0 /Hz	50
网侧电感 L_2 /mH	0.5	开关频 f_{sw} /kHz	10
滤波电容 C /uF	15	采样频率 f_s /kHz	20
PLL 参数	k_{p-PLL} 5.09	$G_c(s)$ 参数	$k_p = 0.051$
	k_{i-PLL} 2 198.2		$k_i = 3.67$
有源阻尼系数 k_d	0.18	电网电压 u_{grms} /V	120
直流母线电 u_{dc} /V	300	控制带宽 ω_c	π

由于电网阻抗波动会导致闭环函数极点位置发生变化,进而影响稳定性裕度。传统的稳定性分析方法(根轨迹和奈奎斯特判据)不够直观,且难以直接揭示电网阻抗变化对系统稳定性边界的影响。因此本文采用赫尔维兹判据,其在处理多变量系统或具有复杂动态特性的系统时的具有很大优势,尤其是对于控制系统的稳定性分析,并且可以提供一个直观的条件来评估系统稳定性。具体来说,赫尔维

兹判据的核心优势在于它能够通过特征方程的系数来判断系统的稳定性,而无需依赖复杂的频域分析或数值求解。

由线性系统时域分析法中 Hurwitz 稳定判据可知,若要保证闭环传递函数 $G_3(s)$ 的极点全部位于 s 的左半平面,那么只需式(11)的特征方程 $M(s)$ 各系数大于 0 即可,其中特征方程 $M(s)$ 表达式为:

$$M(s) = (1 - k_{p-PLL} I_2 Z_g) s^2 + (U_g k_{p-PLL} - k_{i-PLL} I_2 Z_g) s + U_g k_{i-PLL} \quad (12)$$

根据式(12)绘制 $G_3(s)$ 的零极点图和可行域,如图 5 所示。通过将表 1 所示的参数代入式(12)进行计算可知,当电网阻抗小于 11.11 mH 时,闭环传递函数 $G_3(s)$ 的极点全部位于 s 的左半平面,如图 5(a)所示。在此情况下,随着电网阻抗的增大,极点由一对共轭复数极点逐渐变为负实数极点,并且衰减系数也逐步增大。同时,电网阻抗与锁相环耦合控制系统的超调量随着电网阻抗的增大而增加。虽然超调量的增大有助于减小系统的稳态误差,但也可能降低系统的稳定性,甚至引发震荡或失稳现象。若电网阻抗大于 11.11 mH,闭环传递函数 $G_3(s)$ 的极点将出现在 s 右半平面,如图 5(b)所示,此时电网阻抗与锁相环耦合控制系统失去稳定性,无法有效获取并网点电压相位,进而导

致电流控制环路及整个并网逆变器系统失稳。

上述对电网阻抗与锁相环耦合控制系统闭环零极点的分析并结合图 5 可知,弱电网工况下锁相环输入信号中所含的电网阻抗电压分量 $sZ_g i_2$,会畸变原有传统锁相环控制结构。导致锁相环滤波器输入输出信号之间存在一条与电网阻抗相关的正反馈控制回路,进而影响闭环传递函数 $G_3(s)$ 的特征方程。

通过对上述分析,减小或削弱锁相环输入信号中所含的电网阻抗分量 $sZ_g i_2$ 可以有效提高弱电网工况下传统锁相环的稳定性。但是,锁相环引入后,并网逆变器的输出阻抗相位特性会呈现明显衰减,从而可能影响系统的动态稳定性。在考虑上述两点结论时,存在一个问题:当锁相环消除电网阻抗分量 $sZ_g I_2$ 不与电网阻抗发生耦合时,是否会对并网逆变器系统输出阻抗相位产生影响。为深入分析该问题,本文第二章在文献[23]模型基础上建立了电网阻抗自适应协同锁相环结构,简称 GIAC-PLL。

2 新型 PLL 的分析与设计

通过引入支路进行前馈补偿,从而减小电网阻抗与 PLL 耦合机制对系统稳定性的影响,如图 6 所示。

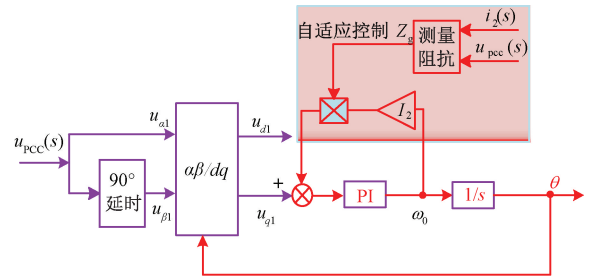


图 6 电网阻抗自适应协同锁相环

Fig. 6 Grid impedance adaptive collaborative phase-locked loop

根据式(10)可知,电网阻抗与锁相环的耦合主要表现为额外的 $I_2 Z_g \omega_0$ 分量。为了消除这种影响,可以通过负反馈控制来消除 $I_2 Z_g \omega_0$ 分量,如图 6 所示。然后求得 GIAC-PLL 结构的等效传递函数式(13)为:

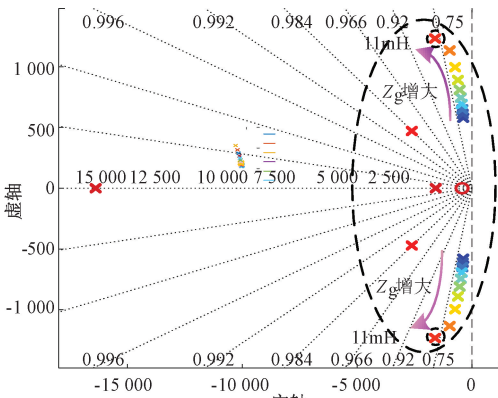
$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\hat{u}_{q1}(s)} = \frac{k_{p-PLL} + k_{i-PLL}/s}{(1 + I_2 L_g k_{p-PLL})s + I_2 L_g k_{i-PLL}} \quad (13)$$

由文献[8]可得:

$$\hat{u}_{q1}(s) = -U_m \hat{\theta}(s) - j \hat{u}_{\alpha 1}(s + j\omega_0) \quad (14)$$

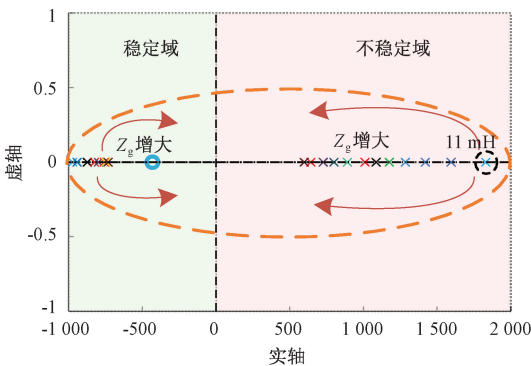
联立式(13)、(14)可得如式(15)所示,对并网电流参考值 $i_{ref}(s)$ 进行分离扰动线性化,联立式(14)、(15)可得式(16)。

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\hat{u}_{\alpha 1}(s + j\omega_0)} = \frac{-j(s k_{p-PLL} + k_{i-PLL})}{\{(1 + I_2 L_g k_{p-PLL})s^2 + (I_2 Z_g k_{i-PLL} + U_m k_{p-PLL})s + U_m k_{i-PLL}\}} \quad (15)$$



(a) $Z_g < 11.11$ mH 时 $G_3(s)$ 的零极点图

(a) The zero-pole diagram of $G_3(s)$ when $Z_g < 11.11$ mH



(b) $Z_g > 11.11$ mH 时 $G_3(s)$ 的零极点图

(b) The zero-pole graph of $G_3(s)$ for $Z_g > 11.11$ mH

图 5 $G_3(s)$ 的零极点图

Fig. 5 Zero-pole plot of $G_3(s)$

$$G_{i-PLL}(s) = \frac{0.5I_2[k_{p-PLL}(s-j\omega_0) + k_{f-PLL}]}{(1 + I_2Z_gk_{p-PLL})(s-j\omega_0)^2 + (I_2Z_gk_{f-PLL} + U_mk_{p-PLL})(s-j\omega_0) + U_mk_{f-PLL}} \quad (16)$$

其中, $G_{GIAC-PLL}(s)$ 为解耦后的锁相环传递函数。

将式(4)所示系统输出阻抗表达式中 $G_{PLL}(s)$ 替换为 $G_{GIAC-PLL}(s)$, 即可得改进后的锁相环控制的系统输出阻抗 $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 为:

$$Z_{GIAC-PLL}(s) = \frac{1 + T_a(s)}{G_2(s) - T_a(s)G_{i-PLL}(s)I_2} \quad (17)$$

根据式(17)可知由于传递函数 $G_{GIAC-PLL}(s)$ 包含电网阻抗相关项, 因此系统输出阻抗 $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 的幅相特性受到电网阻抗的影响, 为了便于分析本节仅以 $Z_g = 10.2 \text{ mH}$ (SCR=3) 和 $Z_g = 30.5 \text{ mH}$ (SCR=1) 为例, 同时结合表 1 所示参数绘制如图 7 所示阻抗 $Z_{GIAC-PLL1}(s)$ 、 $Z_{GIAC-PLL2}(s)$ 、 $Z_{out-PLL}(s)$ 和 $Z_{out}(s)$ 的伯德图。

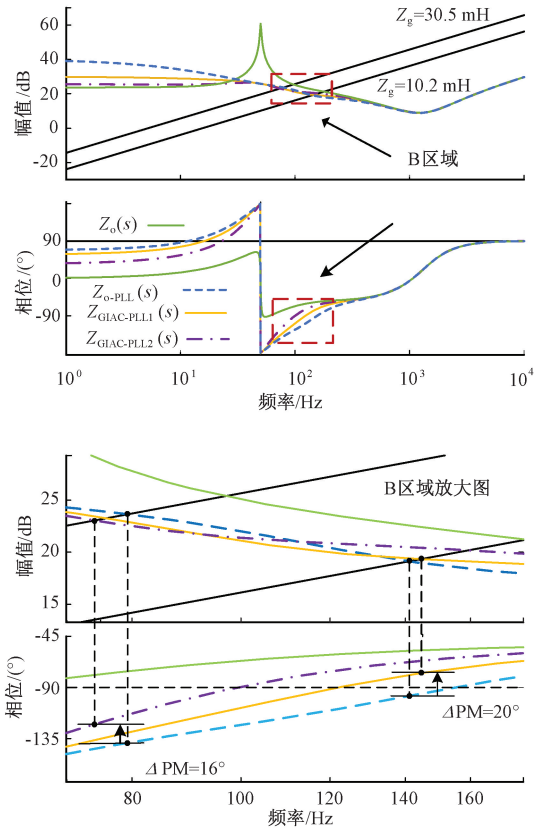


图7 $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 、 $Z_{o-PLL}(s)$ 和 $Z_o(s)$ 的伯德图

Fig. 7 $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 、 $Z_{o-PLL}(s)$ and $Z_o(s)$ Bode diagram

通过图 7 可知 GIAC-PLL 结构显著降低了锁相环对并网逆变器系统输出相位的负面影响。具体而言, 当 $Z_g = 10.2 \text{ mH}$ 时, $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 在交截频率处的相位相较于 $Z_{o-PLL}(s)$ 提升了 20° , 并网逆变器系统由原来的不稳定运行状态转变为稳定运行状态; 当 $Z_g = 30.5 \text{ mH}$ 时, 阻抗 $Z_{o+PLL}(s)$ 在交截频率处的相位相较于 $Z_{o-PLL}(s)$ 提升了 16° ,

但是并网逆变器系统依旧保持失稳状态。此外对比 $Z_{GIAC-PLL}(s)$ 与阻抗 $Z_{out}(s)$ 的相频特性可知, 当电网阻抗过大时仍会降低 $Z_{out}(s)$ 的相频特性, 导致系统在弱电网和极弱电网工况下的稳定性下降甚至引发失稳情况发生。

综上所述, 减小或削弱锁相环输入信号中所含的电网阻抗分量 sZ_gi_2 可以有效提高弱电网工况下传统锁相环的稳定性, 但是, 仅仅通过提高 PLL 的稳定性不足以提高系统的性能, 不足以提高系统的性能, 而且由于锁相环的引入会导致并网逆变器系统输出阻抗相位大幅下降, 进而会引发并网逆变器系统稳定性下降。因此, 同时考虑上述两点结论时会出现一个问题, 即锁相环消除电网阻抗分量 sZ_gi_2 不与电网阻抗发生耦合时, 并网逆变器系统输出阻抗相位是否仍会受到锁相环的影响? 所以为进一步拓展对电网阻抗的适用范围, 满足系统稳定性需求, 在电流环引入补偿环节 $G_A(s)$ 对系统进行阻抗重塑来构建新型系统结构, 如图 8 所示。为了后边便于分析, 新型系统简称 GIAC-C-PLL。

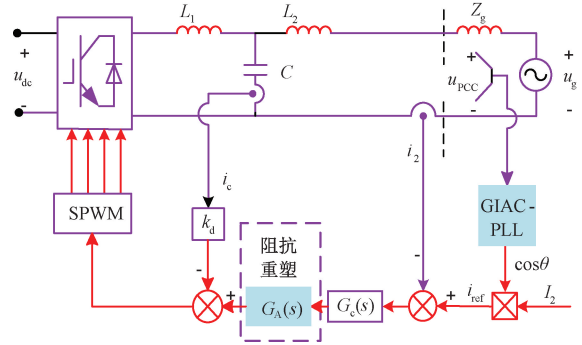


图 8 引入 $G_A(s)$ 补偿的逆变器并网系统控制结构

Fig. 8 Control structure of inverter grid-connected system with $G_A(s)$ compensation

未引入 $G_A(s)$ 的情况下逆变器控制系统计及电网阻抗的开环传递函数为:

$$T_b(s) = \frac{G_2}{1 + G_2 \cdot Z_g} G_c G_1 \quad (18)$$

为了降低式(18)阶次, 使数值更稳定, 同时保证 $T_b(s)$ 的输入-输出映射保持不变, 因此采用 minreal 函数对同一位置的零点与极点进行消除。

令 $G_2 = N_2/D_2$, 消除后 $T_b(s)$ 的表达式为:

$$T_b^{\min}(s) = \frac{G_c(s)G_1(s)}{Z_g(s) + D_2(s)/N_2(s)} \quad (19)$$

根据式(19)以及表 1 绘制开环传递函数 $T_b^{\min}(s)$ 随着 Z_g 变化的零极点以及奈奎斯特图如图 9 和 10 所示。

根据图 9 可知, 电网阻抗 Z_g 增大时, 开环传递函数 $T_b(s)$ 的零极点分布呈现轻微偏移, 但始终未出现右半平面极点。由图 10 可以看出当 Nyquist 图未围绕点 $(-1, j0)$, 即绕数为零, 且开环系统无右半平面极点时, 闭环系统稳定。在本系统中, 所有 Nyquist 曲线均未包围 -1 点, 故

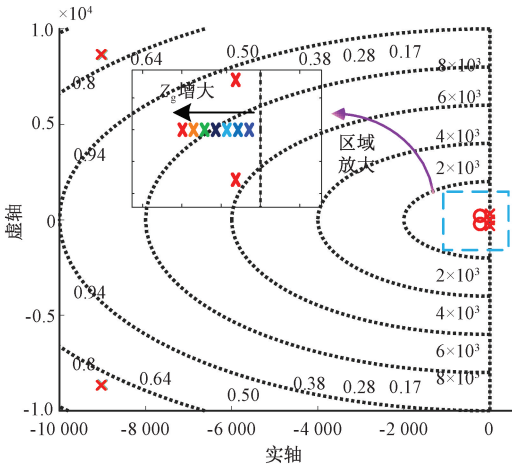


图 9 $T_b(s)$ 随着 Z_g 变化的零极点图

Fig. 9 Zero pole plot of $T_b(s)$ as a function of Z_g

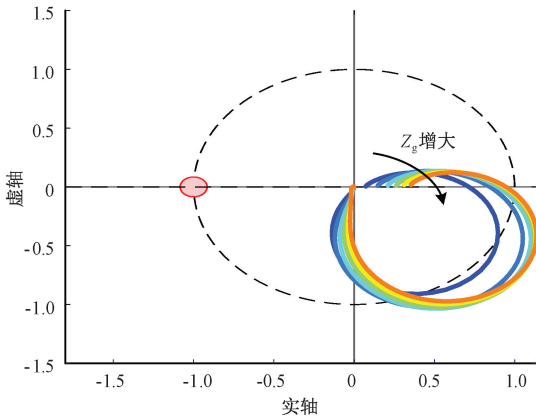


图 10 $T_b(s)$ 随着 Z_g 变化的奈奎斯特图

Fig. 10 Nyquist plot of $T_b(s)$ as a function of Z_g

系统在所选参数下始终保持稳定。由于 Z_g 增大会使奈奎斯特轨迹逼近临界坐标 $(-1, j0)$, 进而导致系统鲁棒性下降, 因此需对 $G_A(s)$ 的参数进行优化设计, 其表达式为:

$$G_A(s) = k \frac{a_1 b s + 1}{b s + 1} \quad (20)$$

绘制 $T_b(s)$ 随着 Z_g 变化的伯德图, 如图 11 所示。由于 Z_g 的增加, $T_b(s)$ 的截止频率从 224 Hz 到 96 Hz, 为了不影响系统的稳定性, 规定最大相位处频率在 50 Hz 到 96 Hz 可以对系统相位进行有效补偿, 满足系统稳定性需求。鉴于此, 取相位最大补偿处频率 $f_m = 80$ Hz, 并且 $T_b(s)$ 的相位裕度由 40° 降到 20° , 为了提高系统相位裕度, 取最大补偿相角为 45° 。

最大相位频率和最大相位补偿表达式为:

$$\begin{cases} \omega_m = \frac{1}{b \sqrt{a_1}} \\ \phi_{\max} = \arcsin\left(\frac{a_1 - 1}{a_1 + 1}\right) \end{cases} \quad (21)$$

代入上述数据可知, $a_1 = 5.8, b = 0.000826$ 。如图 12

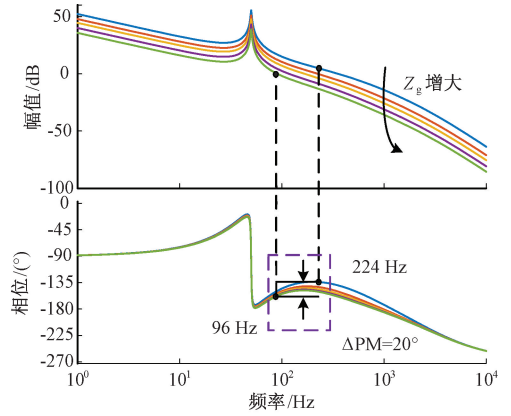


图 11 $T_b(s)$ 随着 Z_g 变化的伯德图

Fig. 11 The Bode plot of $T_b(s)$ with Z_g variation

所示, 由于 k 的取值与 $G_A(s)$ 有关。因此引入系数 k 出于减小误差考虑, 取 $k = 0.6$ 。

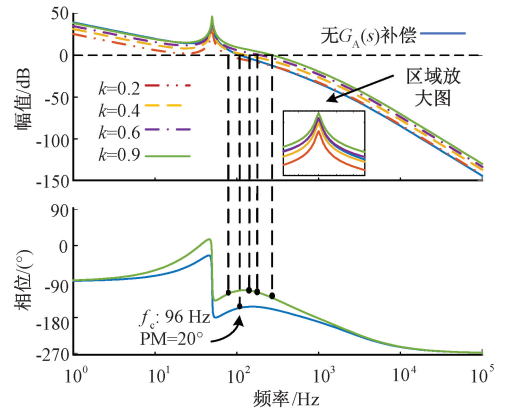


图 12 $G_A(s)$ 补偿后的伯德图

Fig. 12 Bode diagram after $G_A(s)$ compensation

3 系统鲁棒性分析

为了分析新型系统 GIAC-C-PLL 的鲁棒性, 根据图 9 可以得到新型逆变器系统的开环函数表达式为:

$$T_c = G_A(s)G_c(s)G_1(s)G_2(s) \quad (21)$$

进一步得到系统输出阻抗重塑后表达式:

$$Z_{\text{GIAC-C-PLL}}(s) = \frac{1 + T_c(s)}{G_2(s) - T_c(s)G_{\text{GIAC-PLL}}(s)I_2} \quad (22)$$

将表 1 数据代入到 $Z_{\text{GIAC-C-PLL}}(s), Z_{\text{GIAC-PLL}}(s)$ 中绘制在 $Z_g = 10.2$ mH (SCR=3) 和 $Z_g = 20.4$ mH (SCR=1.5) 下的伯德图, 如图 13 所示。

根据图 13 可知, 在电网阻抗 $Z_g = 10.2$ mH (SCR=3) 和 $Z_g = 20.4$ mH (SCR=1.5) 工况下, 经系统阻抗重塑后, 系统相位裕度分别提高了 22.1° 和 51.8° , 此时系统相位裕度分别为 35.3° 和 37.8° , 因此经补偿后的控制系统仍保持足够的稳定裕度。

由文献[23]可知, 电网阻抗 Z_g 值会存在测量误差, 且误

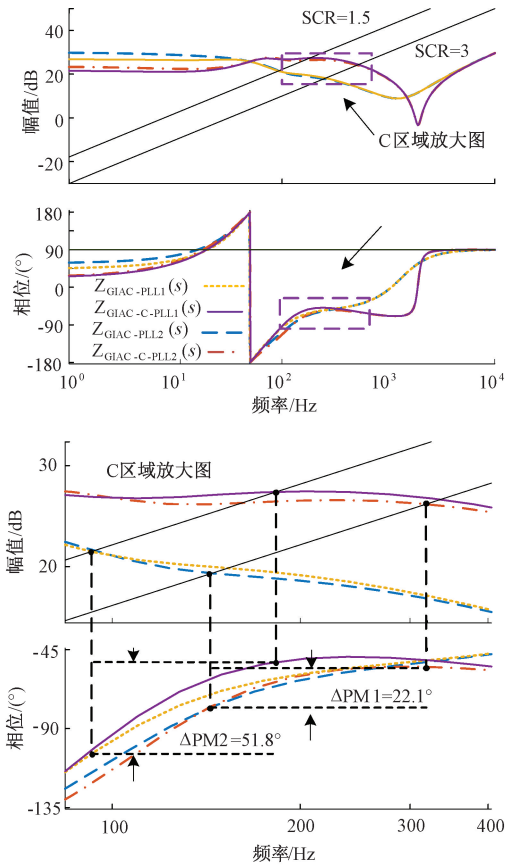


图 13 $Z_{o-X-PLL}(s)$ 和 $Z_{o+PLL}(s)$ 的伯德图

Fig. 13 Bode diagram of $Z_{o-X-PLL}(s)$ and $Z_{o+PLL}(s)$

差范围在 $\pm 20\%$ 之间,因此,以 $Z_g = 20.4 \text{ mH}$ ($\text{SCR} = 1.5$) 为例,绘制其在误差范围内的系统输出阻抗 $Z_{\text{GIAC-C-PLL}}(s)$ 的伯德图如图 14 所示。

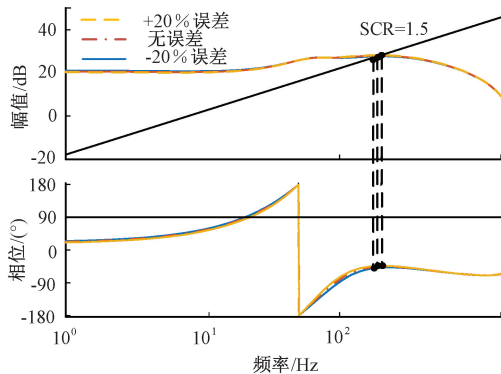


图 14 考虑误差下 $Z_{\text{GIAC-C-PLL}}(s)$ 的伯德图

Fig. 14 Bode diagram of $Z_{\text{GIAC-C-PLL}}(s)$ considering error

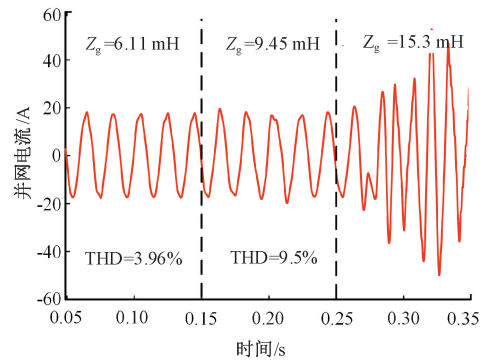
由图 14 可知,在考虑电网阻抗 Z_g 值的误差下,系统的相位裕度几乎无差异,且满足系统稳定性要求。

4 仿真与实验验证

本文基于 MATLAB/Simulink 平台构建了单相 LCL

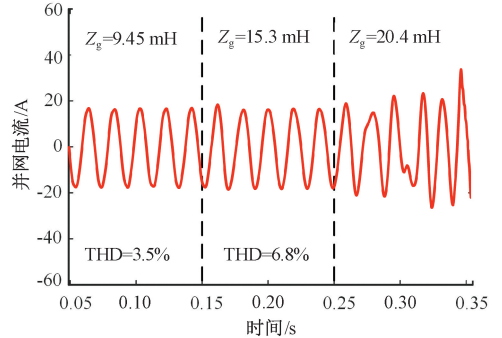
型并网逆变器仿真模型,采用了如表 1 所示的参数配置,以进一步验证所提新型 PLL 控制的有效性。

图 15 对比了传统锁相环、改进型锁相环及新型锁相环 3 种控制策略下的系统动态响应特性。在传统 PLL 控制策略下,如图 15(a)所示:当 $Z_g = 6.11 \text{ mH}$ ($\text{SCR} = 5$) 时,并网电流呈现良好的稳态特性;随着电网阻抗提升至 $Z_g = 9.45 \text{ mH}$ ($\text{SCR} = 3.2$),电流波形开始呈现畸变特征,实测 THD 值达到 9.5% ;当电网阻抗值增至 $Z_g = 20.4 \text{ mH}$ ($\text{SCR} = 1.5$) 时,系统进入失稳状态,并网电流出现幅值持续增长的现象,系统失稳。



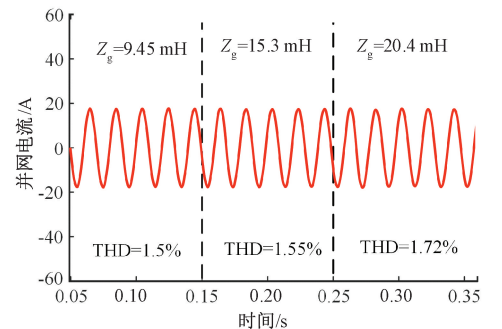
(a) 传统 PLL 控制下 i_g 仿真波形

(a) i_g simulation waveform under traditional PLL control



(b) GIAC-PLL 控制下 i_g 仿真波形

(b) i_g simulation waveform under GIAC-PLL control



(c) GIAC-C-PLL 控制下 i_g 真波形

(c) i_g true waveform under GIAC-C-PLL control

图 15 采用不同控制系统下 i_g 的仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms of i_g under different control systems

使用 GIAC-PLL 控制,如图 15(b)所示,并且对比图 15(a)可知,当 $Z_g=9.45 \text{ mH}(SCR=3.2)$ 时,并网电流总谐波畸变率 THD 降至 3.5%,电流波形稳定;当 $Z_g=20.4 \text{ mH}(SCR=1.5)$ 时,虽仍出现周期性振荡,但其振荡幅值较传统控制方案显著衰减,表明该策略可有效拓展系统稳定的区域。

图 15(c)展示了 GIAC-C-PLL 控制策略在极端弱电网工况下的优越性能,当 $Z_g=20.4 \text{ mH}(SCR=1.5)$ 时,相较于图 15(b)中的改进 PLL 方案,新型策略能使并网电流 THD 显著降低至 1.72%,且低于 5%,可满足并网要求。

为了充分验证新型 PLL 的适用性,本研究构建了 1.5 kW 单相 LCL 并网逆变器实验系统,采用 RTU-BOX204 实时数字控制器,其参数配置按照表 1 所示设计。

图 16 给出了传统 PLL 控制下并网点电压与电流波形。在 $SCR=3(Z_g=9.45 \text{ mH})$ 时,并网电流发生了畸变。此时 Z_g 值超过临界阈值时,系统进入失稳状态,触发实验平台的过流保护机制并导致并网接触器脱扣,系统断开。

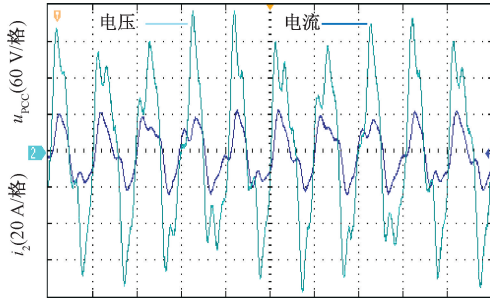


图 16 传统 PLL 控制下 i_g, u_{pcc} 波形

Fig. 16 Waveforms of i_g and u_{pcc} under conventional PLL control

相对于图 16 传统 PLL,图 17 为当 $SCR=2(Z_g=15.3 \text{ mH})$ 时,使用 GIAC-PLL 控制下并网点电压、电流实

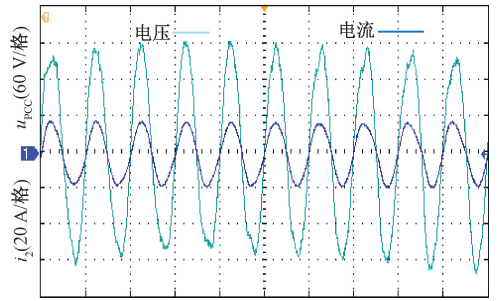


图 17 GIAC-PLL 控制下 i_g, u_{pcc} 波形

Fig. 17 Waveforms of i_g and u_{pcc} under GIAC-PLL control

验波形,电网电压与电流波形质量得到较大改善,并提高了系统稳定性,但是依然存在畸变,并不能满足并网要求。

图 18 为使用 GIAC-C-PLL 控制下并网点电压、电流实验波形。当 $SCR=1.5(Z_g=20.4 \text{ mH})$ 的极端工况下时。对比图 16 和 17,该策略提高了系统稳定性,并网电流能在极端工况下稳定运行且畸变较小,但由于电网阻抗参数的变化,并网电压会受到影响,并且随着 Z_g 的增大,电压低频谐波分量呈现增强趋势。为了体现本文策略的有效性和适用性,对比不同文献,如表 2 所示。

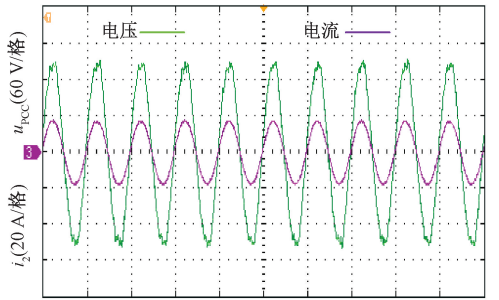


图 18 GIAC-C-PLL 控制下 i_g, u_{pcc} 波形

Fig. 18 Waveforms of i_g and u_{pcc} under GIAC-C-PLL control

表 2 文献指标对比

Table 2 Comparison of literature indicators

参考文献	策略	复杂性	对系统稳定性提升效果	系统适用性	控制精度
文献[8-9,12]	PLL 结构优化	高	优	中等	优
文献[13-15]	消除频率耦合效应	中等	优	中等	优
文献[16-18]	系统阻抗重塑	中等	优	高	优
文献[19]	自适应控制	高	优	高	优
GIAC-C-PLL	电网阻抗自适应协同控制	低	优	高	优

5 结 论

本文针对弱电网下单相并网逆变器的稳定性问题,深入分析了 PLL 动态响应、电网阻抗特性与电流环相互耦合机制。在此基础上,提出了一种 GIAC-C-PLL 控制结构,并得出如下结论:通过在锁相环控制环节中引入一条支路实现了其与电网阻抗的解耦,并在电流环内串联补偿环节

来提高并网逆变器对高电网阻抗的适应能力。所提新型 PLL 控制结构在弱电网和极弱电网下均可以使系统稳定运行。

参考文献

[1] 张路锋,马家庆,陈昌盛,等.基于随机激励的自适应 VSG 光伏逆变控制策略[J].电子测量技术,2025,48(6):10-19.

- ZHANG L F, MA J Q, CHEN CH SH, et al. Adaptive VSG PV inverter control strategy based on random excitation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(6): 10-19.
- [2] 梁文科, 苏淑靖, 梁东飞, 等. 两相静止坐标系下并网逆变器的自抗扰控制[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(10): 7-13.
- LIANG W K, SU SH J, LIANG D F, et al. Active disturbance rejection control of grid-connected inverter in stationary reference frame [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(10): 7-13.
- [3] 刘昊, 方天治, 张惠丽, 等. 弱电网下应对复杂稳定性问题的并网逆变器改进电压前馈通路研究[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(16): 4955-4967.
- LIU H, FANG T ZH, ZHANG H L, et al. Research on an improved voltage feedforward path of grid-connected inverter coping with complex stability issues in weak grid[J]. *Journal of Electrotechnology*, 2024, 39(16): 4955-4967.
- [4] 王毅, 李琼林, 刘书铭, 等. 复杂电网环境下并网逆变器强迫振荡机理分析与抑制[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(6): 51-57.
- WANG Y, LI Q L, LIU SH M, et al. Mechanism analysis and suppression strategy of forced oscillation for grid-connected inverter under complex power grid conditions [J]. *Electrical Measurement Instrumentation*, 2024, 61(6): 51-57.
- [5] 许津铭, 凌子涵, 程成, 等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 370-385.
- XU J M, LIN Z H, CHENG CH, et al. Overview on nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied inverters [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(1): 370-385.
- [6] 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 J S, YAO H D, LI SH Q. 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.
- [7] 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): 3938-3949.
- YANG M, ZHAO Y Y, YANG J, 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): 3938-3949.
- [8] 涂春鸣, 高家元, 李庆, 等. 复数滤波器结构锁相环的并网逆变器对弱电网的适应性研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(12): 2632-2642.
- TU CH M, GAO J Y, LI Q, et al. Research on adaptability of grid-connected inverter with complex coefficient-filter structure phase locked loop to weak grid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(12): 2632-2642.
- [9] 张惠丽, 方天治, 刘昊, 等. 弱电网下基于导纳合成相量法的单相并网逆变器鲁棒性提升技术研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8): 3213-3224.
- ZHANG H L, FANG T ZH, LIU H, et al. Technical investigation on robustness enhancement of single-phase grid-connected inverter based on synthesis-admittance-phasor scheme in weak grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3213-3224.
- [10] LING M, HUANG Y CH, ZHAO J B, et al. Improved scheme of grid-connected inverters based on virtual PCC and impedance remodeling with enhanced steady-state and dynamic performance [J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 238: 111064.
- [11] RONG Q, HU P, YU Y, et al. Virtual external perturbation-based impedance measurement of grid-connected converter [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 72(3): 2644-2654.
- [12] 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): 1567-1577.
- CAO Z H, XIAO X Y, LI Y, 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): 1567-1577.
- [13] 周雪松, 葛建鹏, 马幼捷. 二阶 LADRC 在风电并网逆变器网侧直流母线电压控制中的运用[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(3): 182-191.
- ZHOU X S, GE J P, MA Y J. Application of second-order LADRC in grid side DC bus voltage control of wind power grid-connected inverter [J]. *Electrical Measurement Instrumentation*, 2024, 61(3): 182-191.
- [14] 钱一涛, 赵晋斌, 马俊清, 等. 弱电网基于对称 PLL 结构的并网逆变器频率耦合消除与稳定性增强方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3894-3900.
- QIAN Y T, ZHAO J B, MA J Q, et al. Grid-connected inverter frequency coupling elimination and stability enhancement based on symmetrical PLL structure under weak grid[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3894-3900.

- [15] YANG D SH, WANG X F, LIU F CH, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(2): 1473-1483.
- [16] 杜燕,言明明,杨向真,等.多目标约束下逆变器阻抗的电流矫正方法[J].控制理论与应用,2022,39(4):702-707.
DU Y, YAN M M, YANG X ZH, et al. Current correction method for grid-connected inverter impedance under multi-objective constraints [J]. Control Theory Applications, 2022, 39(4): 702-707.
- [17] 高家元,肖凡,姜飞,等.弱电网下具有新型 PLL 结构的并网逆变器阻抗相位重塑控制[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6683-6691.
GAO J Y, XIAO F, JIANG F, et al. Grid-connected Inverter impedance phase reshaping control with novel PLL structure in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6683-6691.
- [18] 张焯,田慕琴,宋建成,等.弱电网下计及锁相环影响的并网逆变器输出阻抗重塑[J].高电压技术,2021,47(11):4034-4038.
ZHANG Y, TIAN M Q, SONG J CH, et al. Reconstruction of the output impedance of grid-connected inverter considering PLL effect in weak grids[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4034-4038.
- [19] 黄海宏,刘远朋,王海欣.一种适用于复杂电网下的高精度锁相环[J].电机与控制学报,2024,28(3):43-55.
HUANG H H, LIU Y P, WANG H X. A high-precision phase-locked loop suitable for complex power grids [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 43-55.
- [20] 陈博,曾成碧,苗虹.提高并网逆变器在弱电网下稳定性的虚拟阻抗附加相角补偿控制[J].电测与仪表,2023,60(2):132-137.
CHEN B, ZENG CH B, MIAO H. Virtual impedance additional phase angle compensation control to improve the stability of grid-connected inverter in weak grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 132-137.
- [21] 金永康,颜文旭,倪宏宇,等.弱电网下基于 PSO 的并网逆变器锁相环参数设计方法[J].控制工程,2023,30(12):2234-2244.
JIN Y K, YAN W X, NI H Y, et al. Phase-locked loop parameter design for grid-connected inverter based on PSO in weak grid[J]. Control Engineering, 2023, 30(12): 2234-2244.
- [22] 武海涛,张宁宁,曹志轩,等.弱电网下光伏并网系统锁相环参数自适应控制[J].电网与清洁能源,2024,40(1):52-61.
WU H T, ZHANG N N, CAO ZH X, et al. Adaptive control of phase-locked loop parameters of the photovoltaic grid-connected system under weak grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 52-61.
- [23] 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 M, YANG ZH, LI Y L, et al. A phase-locked loop design method based on impedance remodeling of grid-connected inverter under high permeability [J]. Acta Electrotechnical, 2024, 39(2): 554-566.

作者简介

王震(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为并网逆变器控制及稳定性分析。

E-mail:3483204151@qq.com

杨明,副教授,硕士生导师,主要研究方向为新能源并网发电技术、电能质量控制、虚拟同步发电机等。

E-mail:yangming0391@163.com

孙杭,硕士研究生,主要研究方向为并网逆变器控制及稳定性分析。

E-mail:1183572559@qq.com