

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240856

# 高渗透率下计及并网逆变器动态性能的新型锁相环 设计方法及鲁棒性分析

屈克庆<sup>1</sup>, 高畅<sup>1</sup>, 许跃成<sup>1</sup>, 赵晋斌<sup>2</sup>, 毛玲<sup>1</sup>, 曾志伟<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学海上风电研究院, 上海 200090)

**摘要:** 针对高渗透率下并网逆变器输出阻抗与电网阻抗之间相互耦合引发系统稳定性和动态性能下降的问题, 从优化锁相环控制结构角度考虑, 提出一种基于前馈补偿的新型锁相环设计方案。首先, 建立考虑锁相环影响的并网逆变器输出阻抗模型, 基于此模型对传统锁相环和惯性锁相环特性进行分析, 结果表明二者在弱电网下面对电网扰动时系统的动态和稳态性能均有所下降。为解决上述问题, 通过对闭环系统零极点进行合理配置, 推导出基于前馈补偿的新型锁相环结构小信号模型, 同时给出参数设计方法并对其系统性能进行详细分析。分析表明, 所提新型锁相环能够在提供附加惯性与阻尼的同时提升系统鲁棒性, 有效解决弱电网下锁相环引起的系统稳定性与动态性能下降的问题。最后, 通过 RT-LAB 硬件在环实验验证所提新型锁相环设计方案的有效性。

**关键词:** 高渗透率; 并网逆变器; 新型锁相环; 零极点配置; 鲁棒性

## Design method and robustness analysis of a novel phase-locked loop considering the dynamic performance of grid-connected inverters under high penetration

QU Keqing<sup>1</sup>, GAO Chang<sup>1</sup>, XU Yuecheng<sup>1</sup>, ZHAO Jinbin<sup>2</sup>, MAO Ling<sup>1</sup>, ZENG Zhiwei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Offshore Wind Power Research Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To address the issue of system stability and dynamic performance degradation caused by the coupling between the output impedance of grid-connected inverters and grid impedance under high renewable energy penetration, a novel phase-locked loop (PLL) design method is proposed based on feedforward compensation from the perspective of optimizing PLL control structure. First, the output impedance model of the grid-connected inverter considering the influence of the PLL is established. Based on this model, the characteristics of traditional PLL and inertia-based PLL are analyzed. The results reveal that both types exhibit deteriorated dynamic and steady-state performance under weak grid conditions when subjected to grid disturbances. To solve the aforementioned issue, a small-signal model for the novel PLL structure based on feedforward compensation is derived through appropriate pole-zero placement of the closed-loop system. A parameter design method is provided, and a detailed analysis of the system's performance is conducted. The analysis indicates that the proposed novel PLL enhances system robustness while providing additional inertia and damping, effectively addressing the system stability and dynamic performance degradation issue caused by PLL under weak grid conditions. Finally, the effectiveness of the proposed novel PLL design is validated through hardware-in-the-loop (HIL) experiments using RT-LAB.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177184).

**Key words:** high penetration; grid-connected inverter; novel phase locked loop; zero-pole configuration; robustness

## 0 引言

随着“双碳”战略大力发展, 以光伏、风电为

主的新能源发电得到了广泛的应用, 可再生能源通过电力电子变换器大量渗透到电力系统中, 高比例新能源发电是当今发展的必然趋势<sup>[1-5]</sup>。通常分布式发电系统安装在偏远地区, 需要长距离输电线路以及多个变压器, 这会导致电网阻抗不可忽略, 故电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177184)

网表现出弱电网甚至极弱电网特性<sup>[6-8]</sup>。电网的强弱可以通过最大短路比(short circuit ratio, SCR)来评估<sup>[9-11]</sup>。而并网逆变器作为新能源发电装置和电网之间的接口,在弱电网条件下,其稳定性和动态性能问题已经成为一个重要研究热点<sup>[12-16]</sup>。

当前针对弱电网下跟网型逆变器控制系统的稳定性与抗干扰性等问题,国内外学者进行了大量研究分析。在并网控制系统中,相比于功率环,锁相环(phase-locked loop, PLL)在低频段与电网阻抗的交互作用更为明显<sup>[17-18]</sup>。为解决 PLL 引起的低频振荡问题,文献[19]通过串联虚拟阻抗对逆变器系统输出阻抗进行整形重塑,以抵消负阻抗的影响,但需要依赖在线电网阻抗测量环节以及额外的相位补偿环节。为消除 PLL 产生的负面影响,文献[20]提出了一种将公共耦合点(point of common coupling, PCC)处的电压反馈到电流环路中的补偿方法,但其补偿项的阶数很高,计算复杂。文献[21]和文献[22]分别在 PLL 前串联二阶低通和复数滤波器来提高其谐波抑制能力,但前者需要额外相位补偿环节,后者对系统相位裕度提升有一定限制。除了通过阻抗重塑来消除负阻抗影响外,改变 PLL 的控制结构也是一种有效方法。文献[23]中提出了一种对称 PLL 结构来消除频率耦合,但没有考虑 PLL 与电网阻抗耦合引起的负阻抗增量问题。文献[24]提出一种新型 PLL 结构,用二阶振荡环节替代传统的 PI 控制环节,其拥有和前置滤波器 PLL 相同的谐波抑制能力,但为简化系统分析及参数设计,忽略了 PLL 中存在的谐波耦合影响。上述研究均考虑了如何在弱电网条件下提升系统的鲁棒性,而未涉及系统的动态性能。

针对并网系统的动态性能问题,文献[25-26]指出,PLL 带宽与系统的动态性能有必然联系,减小 PLL 带宽能减少负阻抗区域,但系统的动态性能也随之下降。文献[27]提出一种不同控制带宽的双重 PLL 结构,使系统能够适应电网频率的变化,但未考虑其他电网扰动的情况。文献[28]提出了一种基于虚拟同步机特性的惯性锁相环(inertia phase-locked loop, IPLL)结构,其为并网系统提供一定的惯性和阻尼,进而提高系统的抗干扰能力,但它抑制扰动能力有限且不能适应电网阻抗的宽范围变化。虽然改进型 PLL 的结构多种多样,但能同时兼顾弱电网下逆变器工况突变时系统动态性能和鲁棒性的研究尚属少见。

鉴于此,本文以弱电网下单相 LCL 型并网逆变器为研究对象,揭示传统锁相环(traditional phase-locked loop, TPLL)和 IPLL 的弊端,并在此基础上提

出了一种新型 PLL 结构,该结构在提供系统必要惯性与阻尼的同时,通过对闭环系统零极点合理配置进而改善系统的动态性能。此外,采用新型 PLL 控制结构不仅拓宽了弱电网下并网逆变器对电网阻抗的适应范围,同时使系统等效输出阻抗的相频特性向相角增大的方向移动,提高了系统的鲁棒性。最后,通过实验结果验证所提新型 PLL 设计方案的有效性。

## 1 LCL 型并网逆变器数学模型建立

### 1.1 并网逆变器系统描述

单相 LCL 型并网逆变器拓扑结构如图 1 所示。逆变器侧电感  $L_1$ 、滤波电容  $C$  以及并网侧电感  $L_2$  构成 LCL 滤波器。 $u_{in}$  和  $u_{pcc}$  分别表示直流母线电压和 PCC 处电压; $i_L$ 、 $i_g$ 、 $i_c$  分别表示逆变器侧电流、并网电流以及滤波电容电流; $I_{ref}$  与  $i_{ref}$  分别表示电网电流幅值基准和并网电流瞬时值基准; $\theta$  为 PLL 输出相角。将电网视为电压源与电网阻抗的串联模型, $u_g$  为电网电压, $L_g$  为电网阻抗(考虑到最坏情况,本文将其视为纯电感进行以下分析)。 $H_1$  为有源阻尼系数; $H_2$  为电网电流采样系数; $G_{ff}(s)$  为 PCC 电网电压前馈系数; $G_c(s)$  为电流调节器,本文采用 PR 控制器,其传递函数表达式为

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

式中: $k_p$ 、 $k_r$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega_c$  分别表示 PR 控制器的比例系数、谐振系数、谐振角频率以及控制带宽。

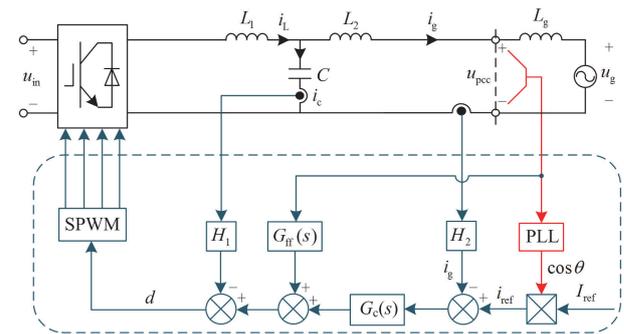


图 1 单相并网逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of single-phase grid-connected inverter

单相并网逆变器整体控制框图如图 2 所示。图中: $G_d(s)$  表示 1.5 拍的数字延迟,即  $G_d(s) = e^{-1.5sT_s}$ , 其中  $T_s$  表示采样周期; $K_{PWM}$  表示脉宽调制增益。

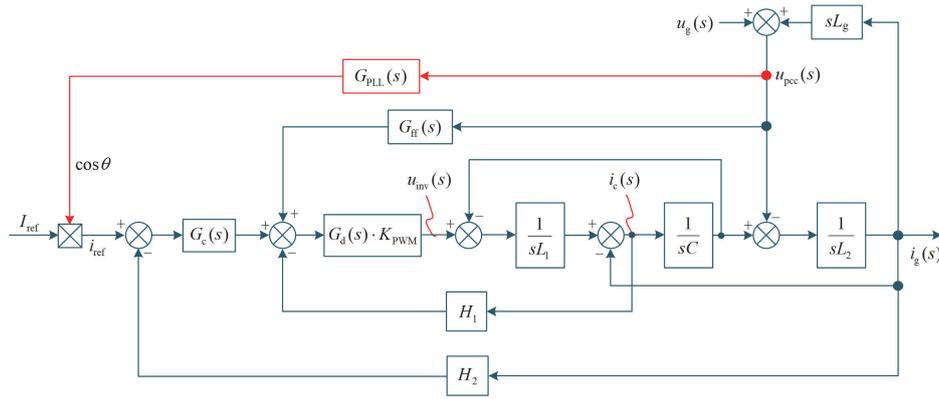


图2 并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of grid-connected inverter

## 1.2 并网逆变器输出阻抗模型

将  $i_{ref}$  视为标准正弦电流信号, 可以推导出系统输出阻抗  $Z_{out}(s)$  的表达式为

$$Z_{out}(s) = \frac{\left\{ L_1 L_2 C s^3 + H_1 G_d(s) K_{PWM} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + G_c(s) G_d(s) K_{PWM} \right\}}{\left\{ L_1 C s^2 + H_1 G_d(s) K_{PWM} C s + 1 - G_{ff}(s) G_d(s) K_{PWM} \right\}} \quad (2)$$

此时未考虑 PLL 影响时的并网逆变器系统等效模型如图 3(a)所示, 逆变器侧视为输出阻抗  $Z_{out}(s)$  与电流源  $i_s(s)$  并联。当考虑 PLL 影响时,  $i_{ref}$  与  $u_{pcc}$  耦合关系表示为:  $i_{ref}(s) = I_{ref} G_{PLL}(s) u_{pcc}(s)$ , 其中  $G_{PLL}(s)$  表示 PLL 环节的传递函数, 进而可推导出考虑 PLL 时系统输出阻抗  $Z_{out\_PLL}(s)$  为

$$Z_{out\_PLL}(s) = \frac{\left\{ L_1 L_2 C s^3 + H_1 G_d(s) K_{PWM} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + G_c(s) G_d(s) K_{PWM} \right\}}{\left\{ L_1 C s^2 + H_1 G_d(s) K_{PWM} C s - G_{ff}(s) G_d(s) K_{PWM} + 1 - I_{ref} G_{PLL}(s) G_c(s) G_d(s) K_{PWM} \right\}} \quad (3)$$

此时考虑 PLL 并网逆变器系统等效模型如图 3(b)所示, 逆变器侧视为 PLL 输出阻抗  $Z_{PLL}(s)$  与  $Z_{out}(s)$  并联。根据图 3(b), 逆变器等效输出阻抗可表示为

$$Z_{out\_PLL}(s) = -\frac{u_{pcc}}{i_g} = \frac{Z_{out}(s) Z_{PLL}(s)}{Z_{out}(s) + Z_{PLL}(s)} \quad (4)$$

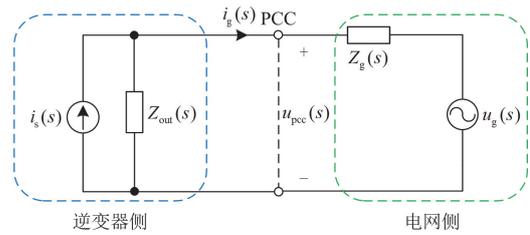
通过式(4)可以推导出电网电流表达式为

$$i_g(s) = -\frac{u_g(s)}{Z_{out\_PLL}(s)} \cdot \frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_{out\_PLL}(s)} \quad (5)$$

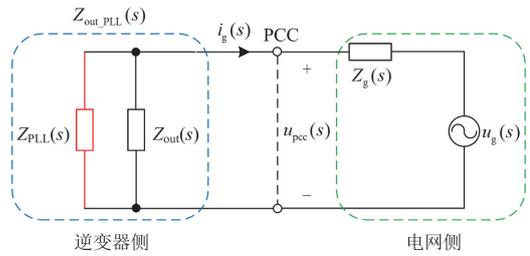
基于文献[17]中的阻抗稳定性判据, 要求电网

阻抗  $Z_g(s)$  与  $Z_{out\_PLL}(s)$  不相交或者在  $Z_g(s)$  与  $Z_{out\_PLL}(s)$  的交截频率  $f_c$  处相位裕度  $\theta_{PM} > 0^\circ$ , 则有

$$\arg(Z_{out\_PLL}(j2\pi f_c)) > -90^\circ \quad (6)$$



(a) 未考虑PLL影响



(b) 考虑PLL影响

图3 并网逆变器系统等效模型

Fig. 3 Equivalent modeling of grid-connected inverter system

为便于下文分析, 本文所涉及到的并网逆变器相关参数如表 1 所示, 选择 PLL 带宽  $f_{BW} = 250$  Hz 来进行设计。

## 2 TPLL 和 IPLL 特性分析

### 2.1 TPLL 特性分析

在单相并网逆变器中, TPLL 因其结构简单、性能良好而受到广泛应用, 其控制框图如图 4 所示。根据文献[21],  $G_{TPLL}(s)$  表达式如式(7)所示。

表 1 并网逆变器相关参数

Table 1 Relevant parameters of grid-connected inverter

参数	数值	参数	数值
额定功率 $P_{out}/kW$	5	电网电压有效值/V	220
直流母线电压 $u_m/V$	400	电网频率 $f_0/Hz$	50
逆变器侧电感 $L_1/mH$	0.75	控制器比例系数 $k_p$	9
并网侧电感 $L_2/mH$	0.45	控制器谐振系数 $k_r$	600
滤波电容 $C/\mu F$	6.8	控制器带宽 $\omega_c/(rad/s)$	6
有源阻尼系数 $H_1$	13	开关频率 $f_s/kHz$	15
电网电流采样系数 $H_2$	1	采样频率 $f_{sw}/kHz$	15
PLL 比例系数 $k_{p\_PLL}$	3	PCC 电网电压前馈系数 $G_{ff}(s)$	0.54
PLL 积分系数 $k_{i\_PLL}$	2000	功率因数角 $\phi_0/(^\circ)$	0

$$G_{TPLL}(s) = \frac{1}{2} \frac{k_{p\_PLL}(s - j\omega_0) + k_{i\_PLL}}{(s - j\omega_0)^2 + U_m[k_{p\_PLL}(s - j\omega_0) + k_{i\_PLL}]} \quad (7)$$

式中： $U_m$  为并网点电压幅值。

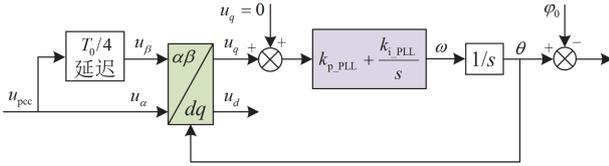


图 4 TPLL 控制框图

Fig. 4 Block diagram of TPLL control

结合表 1 中的数据，由式(2)和式(3)可以绘制出系统输出阻抗  $Z_{out}(s)$ 、TPLL 输出阻抗  $Z_{TPLL}(s)$  以及  $Z_g(s)$  的伯德图如图 5 所示，其中  $\lambda_{SCR}$  为短路比。由图 5 可以看出， $Z_{out}(s)$  在全频域  $\theta_{PM} = 10.21^\circ$ ，而  $Z_{TPLL}(s)$  随着  $L_g$  的增大  $\theta_{PM}$  分别为  $0.03^\circ$ 、 $-24.2^\circ$  以及  $-38.4^\circ$ 。当电网阻抗相同时， $Z_{TPLL}(s)$  的幅频和相频曲线均低于  $Z_{out}(s)$ ，因此考虑 PLL 影响时，系统输

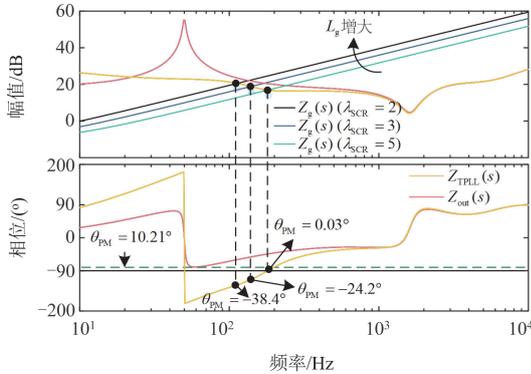


图 5 采用 TPLL 时系统输出阻抗伯德图

Fig. 5 Bode plots of system output impedance with TPLL

出阻抗的交截频率和相位裕度都会下降。故在弱电网环境下，考虑 PLL 的影响可能会导致系统稳定裕度降低，甚至出现失稳。

基于 TPLL 结构的并网系统在受到负载扰动时的输出频率响应波形如图 6 所示。可以看出，在 0.25 s 并网系统负载发生跳变时系统输出频率波动很大，这会给逆变器系统带来冲击，不利于系统的稳定运行。

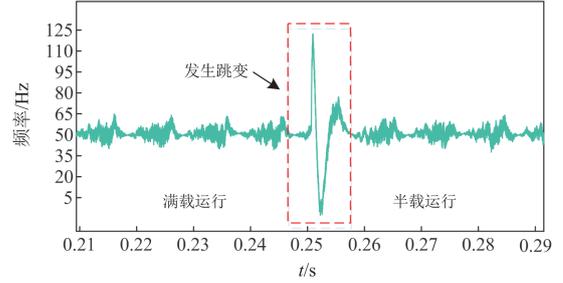


图 6 满载到半载时 TPLL 系统频率响应波形

Fig. 6 Frequency response waveforms with TPLL system at full to half load

## 2.2 IPLL 特性分析

当并网逆变器系统采用虚拟同步机控制时可以模拟传统同步机的特性，如惯性特性。虚拟同步机有功-频率传递函数是一阶惯性环节，与采用 TPLL 的并网逆变器相比，这种惯性特性能够在弱电网下适应相对较宽范围的电网阻抗变化，有助于加强并网逆变器暂态频率稳定性<sup>[28]</sup>。IPLL 控制结构如图 7 所示。

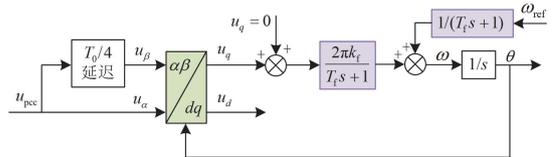


图 7 IPLL 控制结构图

Fig. 7 Control structure diagram of IPLL

依据文献[28]中所提的控制参数设计方法，当 PLL 带宽频率为 250 Hz 时，取阻尼系数  $k_f = 0.454798$ ，惯性时间常数  $T_f = 0.00056278$ ，并得出 IPLL 控制环节的传递函数  $G_{IPLL}(s)$  表达式为

$$G_{IPLL}(s) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi k_f}{T_f(s - j\omega_0)^2 + (s - j\omega_0) + U_m 2\pi k_f} \quad (8)$$

结合式(3)和式(8)可以绘制出基于 IPLL 和 TPLL 对比的系统输出阻抗伯德图，如图 8 所示。图中  $\Delta\theta_{PM}$  表示  $Z_{TPLL}(s)$  和  $Z_{IPLL}(s)$  之间的相位裕度差值。从图 8 中可以看出，IPLL 相比于 TPLL 在中低频段输出阻抗稳定裕度得到提升，同时 IPLL 在

$\lambda_{SCR}$  为 3 时  $\theta_{PM} > 0^\circ$ , 系统稳定, 相比于 TPLL, IPLL 可以适应较宽范围的电网阻抗变化。但随着  $L_g$  的增大, 基于 IPLL 系统的输出阻抗对应的相位逐渐接近  $-90^\circ$ , 如果电网阻抗继续增大则  $\theta_{PM} < 0^\circ$ , 系统失稳。

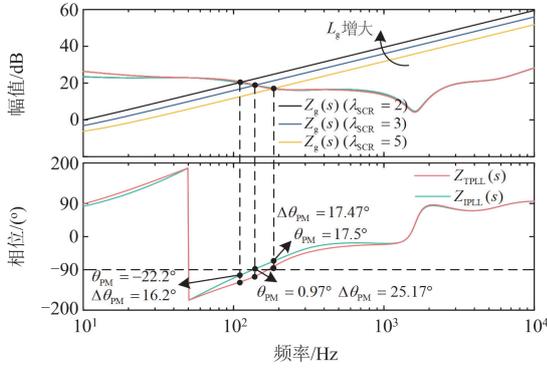


图 8 不同 PLL 结构下系统输出阻抗伯德图

Fig. 8 Bode plots of system output impedance under different PLL structures

基于 IPLL 结构的并网系统在受到负载扰动时输出频率响应波形如图 9 所示。可以看出在 0.25 s 负载发生跳变时输出频率有较大的波动, 但相比于 TPLL 而言波动幅度降低。说明 IPLL 可以给系统提供一定的惯性和阻尼来抑制扰动带来的负面影响, 但其抑制扰动能力有限。

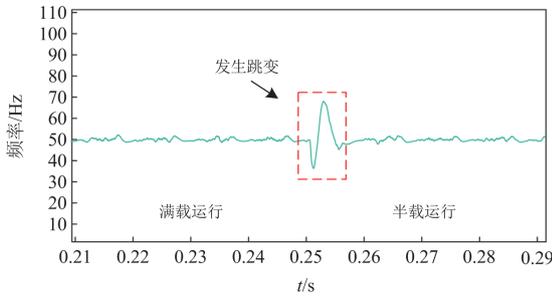


图 9 满载到半载时 IPLL 系统频率响应波形

Fig. 9 Frequency response waveforms with IPLL system at full to half load

### 3 新型 PLL 结构及参数设计

#### 3.1 基于 FCPLL 特性分析及其阻抗模型建立

由于 IPLL 中引入虚拟惯量, 会使其有功闭环系统存在动态振荡和超调的问题, 难以兼具良好的动态特性以及稳态性能。故针对此问题, 本文提出了一种基于前馈补偿的锁相环(feedforward compensation phase-locked loop, FCPLL)结构, 如图 10 所示, 加入前馈模块后可以对原有系统零极点合理配置, 进而提高系统性能。

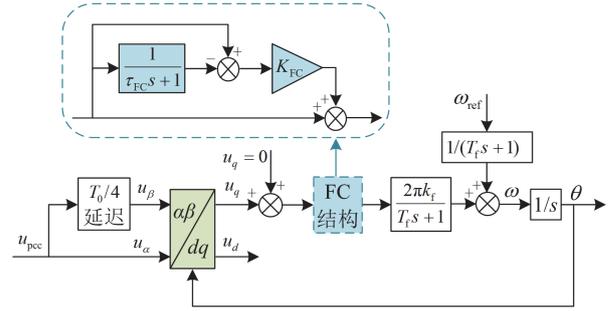


图 10 基于前馈补偿的新型 PLL 结构

Fig. 10 A new PLL structure based on feedforward compensation

为利用阻抗分析法说明所提 FCPLL 结构相比于 TPLL 和 IPLL 更加适应弱电网环境, 以下将推导基于 FCPLL 结构的小信号模型。基于 Park 变换, 可得  $u_q$  时域表达式为

$$u_q(t) = -\sin(\theta) \cdot u_\alpha + \cos(\theta) \cdot u_\beta \quad (9)$$

式中:  $u_q(t)$  为 PCC 处电压  $q$  轴分量随时间的变化量;  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  分别为 PCC 处电压  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴分量。

式(9)采用小信号分析法进行线性化处理, 可得

$$U_q + \hat{u}_q(t) = -\sin(\theta_0 + \hat{\theta}) \cdot (U_\alpha + \hat{u}_\alpha) + \cos(\theta_0 + \hat{\theta}) \cdot (U_\beta + \hat{u}_\beta) \quad (10)$$

式中: 符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示扰动量;  $U_q$  为 PCC 处电压  $q$  轴稳态分量;  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  分别为 PCC 处电压  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴稳态分量;  $\theta_0$  为输出相角基波分量;  $\hat{\theta}$  为 PLL 输出相角的扰动分量。

化简式(10)可得

$$\hat{u}_q(t) = -U_m \hat{\theta} - \hat{u}_\alpha \sin \theta_0 + \hat{u}_\beta \cos \theta_0 \quad (11)$$

由于  $\hat{u}_\beta = -j\hat{u}_\alpha$ , 根据欧拉公式

$\sin \theta_0 = (e^{j\theta_0} - e^{-j\theta_0})/2j$ ;  $\cos \theta_0 = (e^{j\theta_0} + e^{-j\theta_0})/2$ , 对式(11)进行拉氏变换并化简可得

$$\hat{u}_q(s) = -U_m \hat{\theta}(s) - j\hat{u}_\alpha(s + j\omega_0) \quad (12)$$

根据图 10 可得  $\hat{U}_q(s)$  与  $\hat{\theta}(s)$  之间的传递函数表达式为

$$\hat{U}_q(s) \cdot (K_{FC} (1 - \frac{1}{\tau_{FC}s + 1}) + 1) \cdot \frac{2\pi k_f}{T_f s + 1} \cdot \frac{1}{s} = \hat{\theta}(s) \quad (13)$$

式中:  $K_{FC}$  表示前馈补偿系数;  $\tau_{FC}$  表示滤波时间常数。联立式(12)和式(13)可得

$$\hat{\theta}(s) = -j \cdot \frac{2\pi k_f (\tau_{FC} (K_{FC} + 1) s + 1) \cdot \hat{U}_\alpha(s + j\omega_0)}{\left\{ T_f \tau_{FC} s^3 + (T_f + \tau_{FC}) s^2 + \left[ (2\pi k_f U_m \tau_{FC} (K_{FC} + 1) + 1) s + 2\pi k_f U_m \right] \right\}} \quad (14)$$

$i_{ref}$  采用相同方法进行分离扰动线性化, 得到

$\hat{i}_{\text{ref}}(s)$  表达式为

$$\hat{i}_{\text{ref}}(s) = -\frac{I_{\text{ref}}}{2j} \cdot [\hat{\theta}(s - j\omega_0) - \hat{\theta}(s + j\omega_0)] \quad (15)$$

联立式(14)和式(15), 可以推导出  $\hat{i}_{\text{ref}}(s)$  到  $\hat{u}_\alpha(s)$  的传递函数  $G_{\text{FCPLL}}(s)$  表达式为

$$G_{\text{FCPLL}}(s) = \frac{\hat{i}_{\text{ref}}(s)}{\hat{U}_\alpha(s)} = \frac{I_{\text{ref}}}{2} \cdot \frac{2\pi k_f \tau_{\text{FC}} (K_{\text{FC}} + 1)(s - j\omega_0) + 2\pi k_f}{\left\{ T_f \tau_{\text{FC}} (s - j\omega_0)^3 + (T_f + \tau_{\text{FC}})(s - j\omega_0)^2 + (2\pi k_f U_m \tau_{\text{FC}} (K_{\text{FC}} + 1) + 1)(s - j\omega_0) + 2\pi k_f U_m \right\}} \quad (16)$$

### 3.2 FCPLL 结构控制参数设计

由于  $\tau_{\text{FC}}$  表示的是滤波时间常数, 若其取值较大, 将会给并网逆变器系统引入比较大的延迟, 从而影响系统的动态特性和稳定性, 所以  $\tau_{\text{FC}}$  的取值通常会比较小。鉴于此, 根据文献[29]提出的降阶方法, 将式(16)中含有  $\tau_{\text{FC}}$  且不含有  $K_{\text{FC}}$  的项去除并进行化简, 则可得到等效的降阶模型为

$$G'_{\text{FCPLL}}(s) = \frac{I_{\text{ref}}}{2} \cdot \frac{2\pi k_f \tau_{\text{FC}} K_{\text{FC}} (s - j\omega_0) + 2\pi k_f}{[T_f (s - j\omega_0)^2 + 2\pi k_f U_m \tau_{\text{FC}} K_{\text{FC}} (s - j\omega_0) + 2\pi k_f U_m]} \quad (17)$$

令  $s_0 = s - j\omega_0$ , 将式(17)处理成二阶振荡系统的标准形式, 如式(18)所示。

$$G_{\text{FCPLL}}(s_0) = \frac{I_{\text{ref}}}{2U_m} \cdot \frac{2\xi\omega_n s_0 + \omega_n^2}{s_0^2 + 2\xi\omega_n s_0 + \omega_n^2} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = U_m \cdot \frac{2\pi k_f \tau_{\text{FC}} K_{\text{FC}}}{T_f} \\ \omega_n^2 = U_m \cdot \frac{2\pi k_f}{T_f} \end{cases} \quad (19)$$

综合考虑并网系统的稳态和动态性能要求, 选取阻尼比  $\xi = 0.707$ , 可求得  $\tau_{\text{FC}}$  与  $K_{\text{FC}}$  之间的关系表达式为

$$\tau_{\text{FC}} \cdot K_{\text{FC}} = 0.00125 \quad (20)$$

由式(20)可以看出,  $\tau_{\text{FC}}$  与  $K_{\text{FC}}$  之间呈现出反比例函数的关系。选取两组数据进行对比分析, 如表2和表3所示。

根据表2和表3中的数据绘制出对应的系统输出阻抗伯德图分别如图11和图12所示。由图11和图12可以看出,  $K_{\text{FC}}$  和  $\tau_{\text{FC}}$  的取值对于并网逆变器系统输出阻抗的相位裕度影响不大, 接下来将主要分析这两个参数对于系统动态特性的影响。

图13给出了  $K_{\text{FC}}$  和  $\tau_{\text{FC}}$  在不同取值时 FCPLL 并

表2  $K_{\text{FC}}$  在 0.1~1 内不同取值时的参数

参数	取值				
$K_{\text{FC}}$	0.1	0.3	0.5	0.7	1
$\tau_{\text{FC}}(s)$	$1.25 \times 10^{-2}$	$4.17 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$1.79 \times 10^{-3}$	$1.25 \times 10^{-3}$

表3  $K_{\text{FC}}$  在 1~10 内不同取值时的参数

参数	取值				
$K_{\text{FC}}$	1	3	5	7	10
$\tau_{\text{FC}}(s)$	$1.25 \times 10^{-3}$	$4.17 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.79 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$

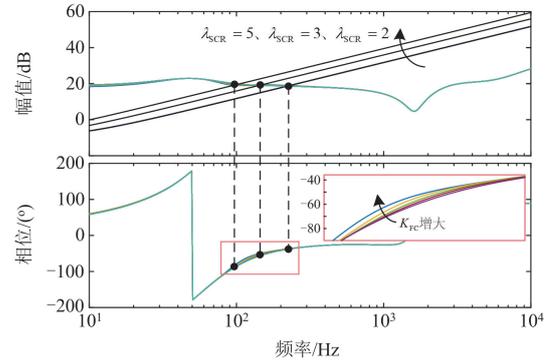


图11  $K_{\text{FC}}$  在 0.1~1 内不同取值时系统输出阻抗伯德图

Fig. 11 Bode plots of system output impedance when  $K_{\text{FC}}$  takes different values between 0.1~1

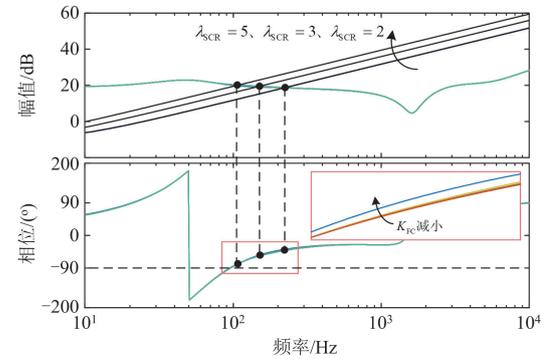


图12  $K_{\text{FC}}$  在 1~10 内不同取值时系统输出阻抗伯德图

Fig. 12 Bode plots of system output impedance when  $K_{\text{FC}}$  takes different values between 1~10

网逆变器系统在 0.25 s 负载发生突变时系统输出频率的动态响应波形。当选取  $K_{\text{FC}} = 1$ ,  $\tau_{\text{FC}} = 1.25 \times 10^{-3}$  时系统在扰动下输出频率的波动最小。因此, 本文选取  $K_{\text{FC}} = 1$ ,  $\tau_{\text{FC}} = 1.25 \times 10^{-3}$ 。

为验证 FCPLL 结构相较于 TPLL 以及 IPLL 具有更好的动态响应特性, 以下将考虑电网频率跳变、电网相角跳变以及负载突变 3 种扰动情况, 对比分析不同 PLL 结构下系统输出频率动态响应波形, 如

图 14 所示。

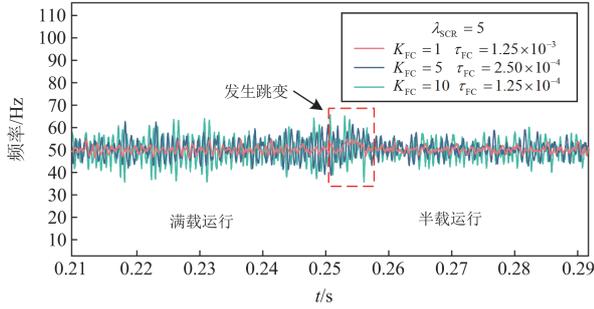


图 13 不同参数下满载到半载系统输出频率响应波形图  
Fig. 13 Frequency response waveforms of full to half load system with different parameters

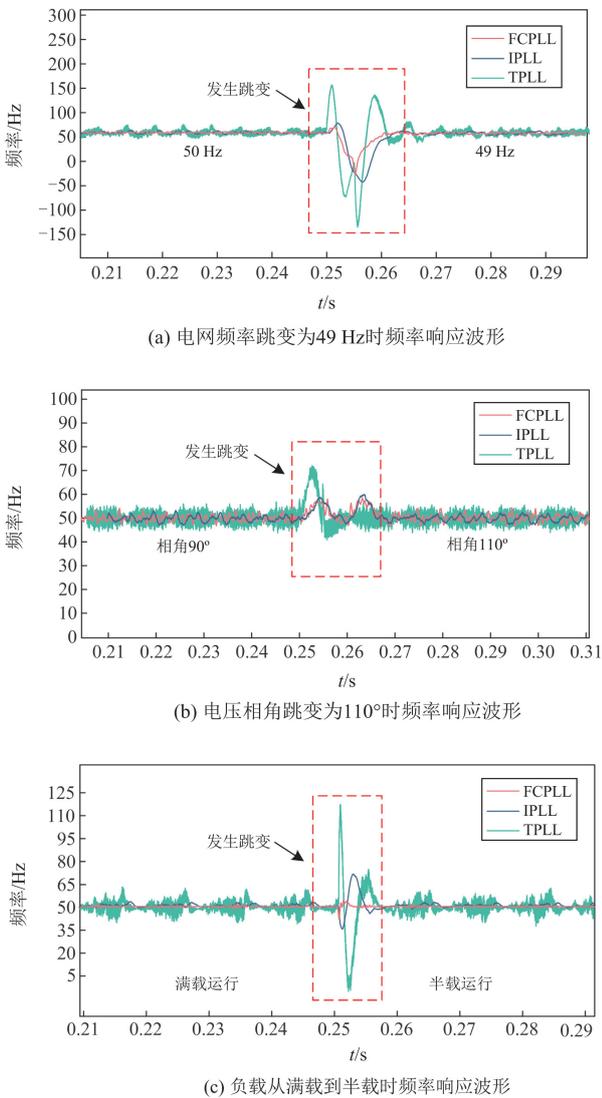


图 14 运行条件突变时不同 PLL 结构下系统输出频率的动态响应波形

Fig. 14 Dynamic response waveform of different PLL structures when operating conditions change suddenly

根据图 14 的仿真结果可以看出:在相同的 PLL 带宽下,不论是电网频率或相角跳变还是负载突变,基于 FCPLL 结构输出频率波动幅值均小于 TPLL 和 IPLL。这表明在频率跟踪过程中,FCPLL 结构提供了必要的惯性和阻尼,有助于稳定 PLL 的输出频率。而 TPLL 结构不具备此特性,当系统受到外界扰动时,输出频率有较大波动;IPLL 结构虽能给系统提供支撑,但抑制波动能力有限。因此,本文所提出的 FCPLL 相比于 TPLL 与 IPLL 动态性能更好,更能适应电网的变化。

### 3.3 系统鲁棒性分析

并网逆变系统在不同 PLL 结构下等效输出阻抗的伯德图如图 15 所示。当采用 TPLL 控制时,随着  $\lambda_{SCR}$  减小,系统输出阻抗与电网阻抗在交截频率范围内的相位裕度逐渐降低,系统鲁棒性下降直至失稳;而采用 IPLL 控制时,尽管系统相位裕度有所提升,但与 TPLL 相比效果并不显著,当电网阻抗进一步提高,系统还是会逐步趋于失稳状态;而采用 FCPLL 结构控制时,当电网阻抗分别为  $L_g = 6.16 \text{ mH} (\lambda_{SCR} = 5)$ 、 $L_g = 10 \text{ mH} (\lambda_{SCR} = 3)$  和  $L_g = 15 \text{ mH} (\lambda_{SCR} = 2)$  时,此时基于 FCPLL 系统的相位裕度分别为  $53.21^\circ$ 、 $41.62^\circ$  和  $12.11^\circ$ ,与 TPLL 比较,系统的相位裕度分别提升了  $53.18^\circ$ 、 $65.82^\circ$  和  $50.51^\circ$ ;与 IPLL 相比,系统的相位裕度分别提升了  $35.71^\circ$ 、 $40.65^\circ$  以及  $34.31^\circ$ 。 $Z_{FCPLL}(s)$  在交截频率处的相位均在  $-90^\circ$  之上,因此基于 FCPLL 结构的并网系统具有良好的鲁棒性。综上所述,本文提出的 FCPLL 结构在弱电网环境下表现出更强的适应性,提升系统鲁棒性的同时也可以适应更宽范围的电网阻抗变化。

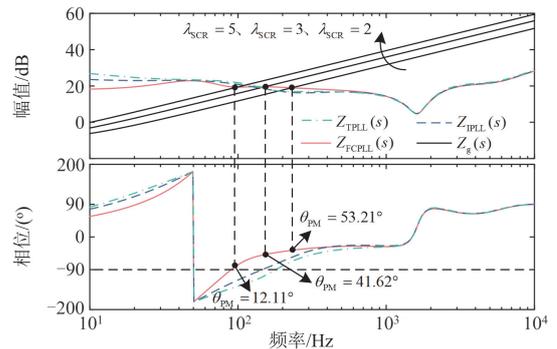


图 15 不同 PLL 结构下等效输出阻抗伯德图

Fig. 15 Bode plots of equivalent output impedance under different PLL structures

## 4 实验验证

为验证所提 FCPLL 结构的有效性,在 RT-LAB

半实物仿真验证平台上搭建了一台电压 220 V、额定功率 5 kW 的单相并网逆变器模型。硬件在环系统主要由 DSP 控制板和 RT-LAB 平台组成。DSP 采集 RT-LAB 输出电压与电流信号后依据相应控制策略生成 PWM 信号,接着经 IO 口返回到 RT-LAB 模型中,最后通过所连接的示波器观察系统运行情况。实验平台如图 16 所示,具体实验参数如表 1 所示。

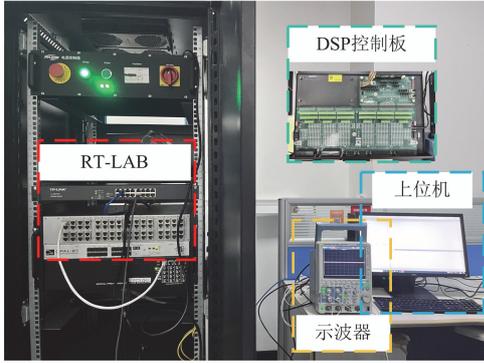
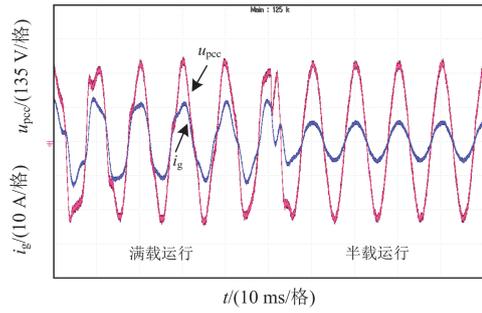


图 16 实验平台

Fig. 16 Experimental platform

采用 TPLL 控制的并网逆变器发生负载扰动时系统输出频率以及并网点电压、电流的实验波形如图 17 所示。从图 17(a)可以看出,扰动时系统的输出频率波动较大,波动幅值差  $\Delta f_o$  为 123.6 Hz,不利于系统安全稳定运行。从图 17(b)和图 17(c)可知,当电网阻抗  $L_g = 6.16$  mH 时,此时系统处于稳定状态,当  $L_g = 10$  mH 且逆变器系统半载运行时,并网



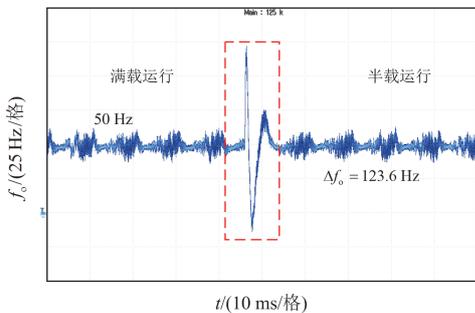
(c)  $L_g = 10$  mH 时, 并网电压和电流波形

图 17 采用 TPLL 结构时的并网实验波形

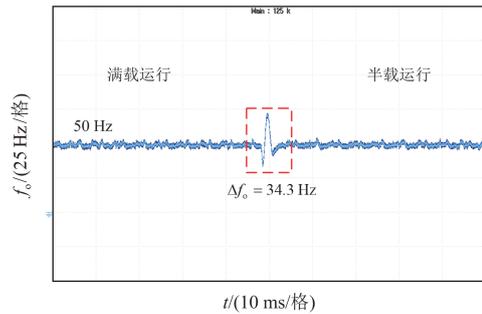
Fig. 17 Grid-connected experimental waveforms with TPLL structure

电流幅值较小,其对 PLL 影响较小,PLL 输出相角  $\theta$  精度高,因此并网电流得到了有效控制;当逆变器系统处于满载运行时,并网电流幅值较大,其对锁相环影响变大,PLL 输出相角  $\theta$  发生畸变导致参考电流畸变,进而影响并网电流与 PCC 处电压,难以满足并网要求。

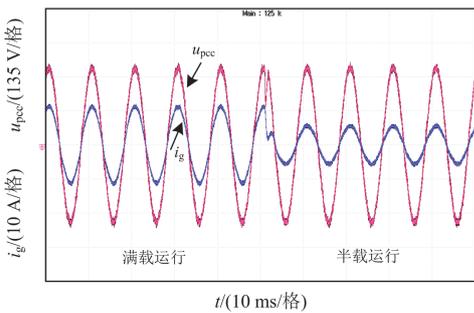
采用 IPLL 控制的并网逆变器发生负载扰动时系统输出频率以及并网点电压、电流的实验波形如图 18 所示。从图 18(a)中可以看出,采用 IPLL 结构的并网逆变器系统在发生负载扰动时,系统输出频率波动较小,波动幅值差为 34.3 Hz,远小于 TPLL。从图 18(b)和图 18(c)可知,当  $L_g = 10$  mH 时,系统处于稳定状态,当  $L_g = 15$  mH 时,并网电流出现畸变,若电网阻抗继续增加,系统会失稳且难以满足



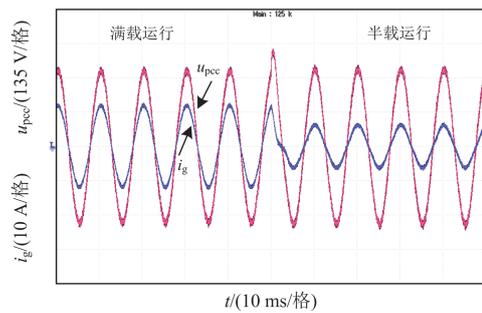
(a)  $L_g = 6.16$  mH 时, 输出频率波形



(a)  $L_g = 6.16$  mH 时, 输出频率波形



(b)  $L_g = 6.16$  mH 时, 并网电压和电流波形



(b)  $L_g = 10$  mH 时, 并网电压和电流波形

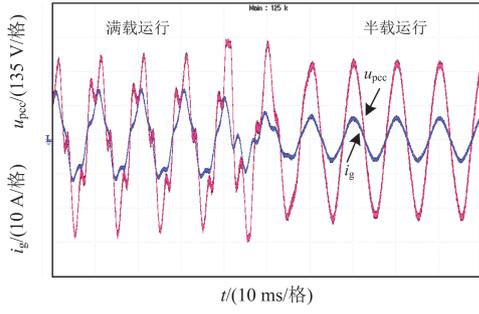

 (c)  $L_g = 15$  mH时, 并网电压和电流波形

图 18 采用 IPLL 结构时的并网实验波形

Fig. 18 Grid-connected experimental waveforms with IPLL structure

并网要求。因此, 采用 IPLL 结构时并网逆变器系统难以适应电网阻抗宽范围变化。

采用 FCPLL 控制的并网逆变器发生负载扰动时系统输出频率以及并网点电压、电流的实验波形如图 19 所示。从图 19(a)中可以看出, 当电网阻抗  $L_g = 6.16$  mH 时, 系统发生扰动时输出频率的波动幅值差仅为 3.27 Hz, 远远小于 TPLL 以及 IPLL, 很大程度上抑制了外界扰动对系统的冲击。从图 19(b)和图 19(c)可以看出, 当  $L_g = 10$  mH 和  $L_g = 15$  mH 时, 逆变器系统无论满载还是半载运行, 并网电流依旧稳定, 系统鲁棒性提高。与 TPLL 和 IPLL 相比, 本文所提出的 FCPLL 结构能够在弱电网下更进一步拓宽电网阻抗的适应范围, 使其在弱电网下依旧保持良好的动态性能和鲁棒性。

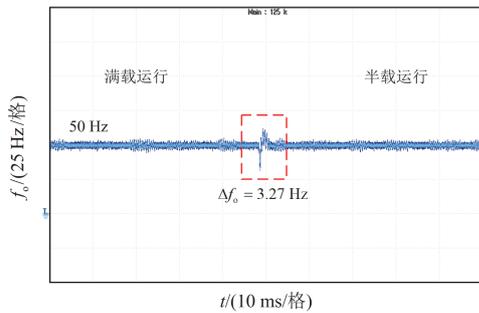
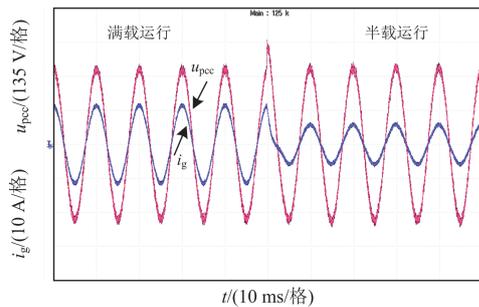
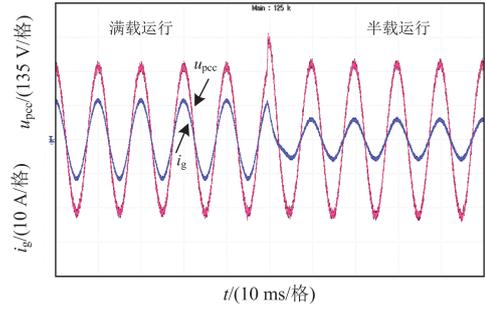

 (a)  $L_g = 6.16$  mH时, 输出频率波形

 (b)  $L_g = 10$  mH时, 并网电压和电流波形

 (c)  $L_g = 15$  mH时, 并网电压和电流波形

图 19 采用 FCPLL 结构时的并网实验波形

Fig. 19 Grid-connected experimental waveforms with FCPLL structure

## 5 结论

本文针对高渗透率下并网逆变器输出阻抗和电网阻抗之间相互耦合所引发的系统稳定性和动态性能下降问题, 提出一种基于前馈补偿的新型 PLL 结构, 其提高了系统鲁棒性的同时也改善了系统的动态性能, 并得出以下结论。

1) 高渗透率下, 当并网逆变器运行状态发生突变时, IPLL 可以提供 TPLL 缺少的惯性与阻尼, 削弱扰动带来的负面影响, 提升系统的稳定性, 但其抑制波动能力不足且不能适应电网阻抗宽范围变化。

2) 相比于 IPLL, FCPLL 不仅能提供附加的惯性与阻尼, 还能在不牺牲 PLL 带宽的前提下, 有效抑制并网逆变器运行状态突变导致的 PLL 输出频率大幅波动。同时逆变器系统可以适应更宽范围的电网阻抗, 显著提高系统的稳态和动态性能。

## 参考文献

- [1] 陈宇, 王维庆, 李笑竹, 等. 面向多运行模式的并网逆变器改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 13-22.  
CHEN Yu, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Improved control strategy for a grid-connected inverter for multiple operational modes[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 13-22.
- [2] MAHIDIN E, NASARUDDIN H H, ZAKI M, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-18.
- [3] 王泽昆, 程鹏, 贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 118-127.  
WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter[J].

- Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118-127.
- [4] 李逸欣, 吴伟杰, 张伊宁, 等. 大规模新能源接入的电力系统惯量缺失机理及惯量水平评估[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 132-139.  
LI Yixin, WU Weijie, ZHANG Yining, et al. Mechanism of inertia loss and evaluation of inertia level in power systems with large scale new energy access[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 132-139.
- [5] 曹文君, 张岩, 张安彬, 等. 弱电网条件下分布式光伏并网系统谐振机理及影响特性[J]. 电力建设, 2024, 45(3):149-159.  
CAO Wenjun, ZHANG Yan, ZHANG Anbin, et al. Resonance mechanism and influence characteristics of distributed photovoltaic grid-connected system under weak grid conditions[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 149-159.
- [6] 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.
- [7] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and development path of improving the flexibility of new energy power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [8] 贾伯岩, 马天祥, 张智远, 等. 计及不确定性的含分布式发电并网的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 35-42.  
JIA Boyan, MA Tianxiang, ZHANG Zhiyuan, et al. Fault section location method for distribution networks with distributed generation and grid connection considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 35-42.
- [9] LIU J, DU X, SU X, et al. A phase feed-forward method to enhance inverter-grid system stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 150.
- [10] 汪林光, 谢小荣, 贺静波, 等. 采用多元线性回归方法分析短路比对风电并网系统小干扰稳定性的影响[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 113-118.  
WANG Linguang, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Multiple-linear-regression based analysis of the impact of short circuit ratio on small-disturbance stability of wind power grid-connection systems[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 113-118.
- [11] 于琳琳, 贾鹏, 杨游航, 等. 计及短路比约束的新能源场站布点及网架协调规划方法[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 24-33.  
YU Linlin, JIA Peng, YANG Youhang, et al. Coordinated planning method for new energy station siting and network considering short circuit ratio constraints[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 24-33.
- [12] 陈林, 徐永海, 王天泽, 等. 弱电网下计及背景谐波的多并网逆变器阻抗重塑谐振抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 59-72.  
CHEN Lin, XU Yonghai, WANG Tianze, et al. Resonance suppression method for multiple grid-connected inverters with impedance remodeling with background harmonics in a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 59-72.
- [13] 柳丹, 江克证, 康逸群, 等. 弱电网下新能源逆变器自同步电压源低电压穿越控制方法[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 21-29.  
LIU Dan, JIANG Kezheng, KANG Yiqun, et al. Self-synchronization voltage source LVRT control method for new energy inverter under weak grid[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 21-29.
- [14] 刘建锋, 李美玉, 余光正, 等. 考虑 VSC 系统谐波稳定条件下的 LCL 滤波器参数优化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 80-90.  
LIU Jianfeng, LI Meiyu, YU Guangzheng, et al. Optimization design method of LCL filter parameters considering harmonic stability of VSC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 80-90.
- [15] 李明飞, 吴在军, 全相军, 等. 计及阻尼特性的构网型并网逆变器暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 198-207.  
LI Mingfei, WU Zaijun, QUAN Xiangjun, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming grid-connected inverter considering damping characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 198-207.
- [16] 许津铭, 乔瑜, 罗运虎, 等. 开环同步型单相并网逆变器小干扰建模与弱电网下稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6136-6145.  
XU Jinming, QIAO Yu, LUO Yunhu, et al. Small-disturbance modeling and stability analysis of single-phase grid-tied inverter with open-loop synchronization under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6136-6145.

- [17] GUO Bin, ZHANG Xin, MA Hao, et al. A series impedance reshaping control method considering PLL dynamics for grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 4896-4910.
- [18] FANG Tianzhi, LIU Hao, ZHANG Huili, et al. Robust technique using the optimized grid voltage feedforward to conquer the impact induced by dual factors for grid-connected inverter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7199-7209.
- [19] 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. High permeability based on grid inverter phase-locked loop design method of impedance remodeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 554-566.
- [20] ZHANG Xueguang, LI Meng, XU Dianguo. PCC voltage perturbation path analysis and compensation for grid-connected voltage-source converter under weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12331-12339.
- [21] 许津铭, 卞申一阳, 钱浩, 等. 弱电网下单相并网逆变器延时锁相环的鲁棒控制及优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2062-2070.  
XU Jinming, BIAN Shenyiyang, QIAN Hao, et al. Robust control and optimization of delay-based phase-locked loop of single-phase grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2062-2070.
- [22] 涂春鸣, 高家元, 李庆, 等. 具有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 Chunming, GAO Jiayuan, LI Qing, 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.
- [23] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1473-1483.
- [24] 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.
- [25] LIN Xianfu, LIU Yupeng, YU Jingrong, et al. Stability analysis of three-phase grid-connected inverter under the weak grids with asymmetrical grid impedance by LTP theory in time domain[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 1-17.
- [26] DEWANGAN L, BAHIRAT H J. Controller interaction and stability margins in mixed SCR MMC-based HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2835-2846.
- [27] HUANG Liang, WU Chao, ZHOU Dao, et al. A double-PLLs-based impedance reshaping method for extending stability range of grid-following inverter under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4091-4104.
- [28] 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): 6682-6694.  
GAO Jiayuan, XIAO Fan, JIANG Fei, et al. Grid-connected inverter impedance phase reshaping control with novel PLL structure in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6682-6694.
- [29] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 引入暂态电磁功率补偿的VSG控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1421-1429.  
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. VSG control strategy with transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1421-1429.

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-10-11

作者简介:

屈克庆(1970—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及在新能源和电力系统中的应用; E-mail: kqqu@shiep.edu.cn

高畅(1999—), 女, 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: blxggt@126.com

(编辑 魏小丽)