

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210569

弱电网下计及锁相环影响的 LCL 型并网逆变器控制策略

刘人志, 陈卓, 唐文博, 朱家文

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 新能源并网逆变器在弱电网下易诱发宽频带振荡。为分析振荡失稳的发生机理, 首先基于复矢量传递函数方法建立了计及锁相环影响的三相 LCL 型并网逆变器阻抗模型, 然后分析了频率耦合的机理。在此基础上推导出并网逆变器系统与电网阻抗交互作用的等价输出阻抗模型, 应用阻抗稳定性判据分析了锁相环对并网逆变器稳定性的影响。为抑制锁相环对并网逆变器系统稳定性带来的不利影响, 提出了扰动电压前馈补偿的改进控制策略。最后通过 Matlab/Simulink 搭建模型进行仿真, 验证了基于所建立阻抗模型判别稳定性的准确性和改进控制策略的有效性。

关键词: 弱电网; LCL 型并网逆变器; 锁相环; 阻抗模型; 复矢量; 控制策略

Control strategy of an LCL type grid-connected inverter with the influence of a phase-locked loop under a weak power grid

LIU Renzhi, CHEN Zhuo, TANG Wenbo, ZHU Jiawen

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In a new energy grid-connected inverter it is easy to induce wide-band oscillation under a weak power grid. To analyze the occurrence mechanism of oscillation instability, the impedance model of a three-phase LCL grid-connected inverter considering the influence of phase-locked loop is established based on the complex vector transfer function method. Then the mechanism of frequency coupling is analyzed. The equivalent output impedance model of the interaction between grid-connected inverter system and grid impedance is derived, and the influence of phase-locked loop on the stability of the grid-connected inverter is analyzed using an impedance stability criterion. To limit the adverse effect of the phase-locked loop on the stability of the grid-connected inverter system, an improved control strategy of disturbance voltage feedforward compensation is proposed. Finally, a Matlab/Simulink model is built to verify the accuracy of the stability judgment based on the established impedance model and the effectiveness of the improved control strategy.

This work is supported by the Science and Technology Plan of Guizhou Province (No. [2018]5615).

Key words: weak power grid; LCL grid-connected inverter; PLL; impedance model; complex vector; control strategy

0 引言

为应对能源危机和环境污染, 基于可再生能源的分布式发电被广泛应用^[1-4]。然而分布式发电系统并网的输电线路阻抗和变压器较大, 使电网呈现弱电网特性^[5-8]。作为可再生能源发电单元与电网之间的能量变换接口, 并网逆变器和电网间的稳定性问题已经成为一个重要的研究热点^[9-11]。锁相环 (Phase-locked loop, PLL) 为并网系统提供同步频率和相位^[12]。电网呈弱电网特性时, 并网系统与电网阻

抗发生交互作用极易造成并网点电压扰动, 首先将会影响 PLL 获取相角信息的准确性, 进而影响控制环节, 从而对整个并网系统的稳定性产生不利影响^[13]。因此, 弱电网下并网逆变器系统进行计及 PLL 影响的稳定性分析和控制策略研究是十分必要的。

基于阻抗模型的分析方法已经广泛应用于并网逆变器系统与电网交互的稳定性分析。文献 [14-15] 研究表明在对并网逆变器进行 dq 域小信号阻抗建模时, 由于 PLL 影响会使 q - q 通道呈现负阻抗效应, 该效应随着 PLL 带宽的增加愈加不利于并网系统稳定; 其中文献 [15] 基于广义奈奎斯特判据 (Generalized Nyquist Criterion, GNC) 对并网逆变器

基金项目: 贵州省科技计划项目资助 ([2018]) 5615)

图 2 为在基频 f_0 的 dq 坐标系建立的计及 PLL 影响的 LCL 型并网逆变器并入理想电网小信号模型, V_{cr} 为三角载波幅值, 红色方框中的部分是主电路部分通过复矢量理论和拉普拉斯频移特性变换到基频 f_0 的 dq 坐标系的复矢量表示; 由于 PLL 的不对称控制导致扰动量在基频 f_0 的主电路 dq 坐标系与控制部分基频为 f 的 dq 坐标系传递时有一个 ΔX_{pdq} (其中 X 可以为并网电流 I_2 、电容电流 I_c 和占

空比 D) 的扰动偏差量, 根据文献[19]可得

$$X_{pdq}^f = X_{pdq} + \Delta X_{pdq} \quad (4)$$

$$\Delta X_{pdq} = -\frac{U_{pdq} - U_{pdq}^*}{2} X_{dq} G_{pll}(s) \quad (5)$$

式中: X_{dq} 为并网系统稳态工作点的复矢量; X_{pdq} 为扰动量在基频 f_0 下的复矢量; X_{pdq}^f 为扰动量在基频 f 下的复矢量。

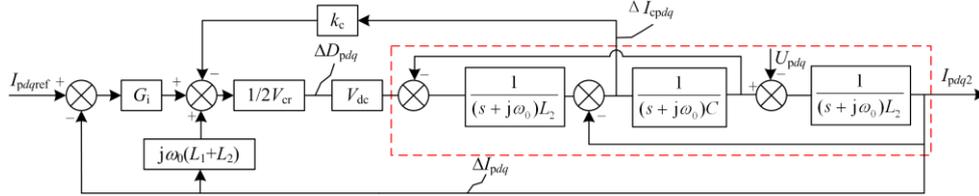


图 2 计及锁相环影响的 LCL 型并网变流器小信号模型

Fig. 2 Small signal model of LCL type grid-connected converter taking into account the influence of PLL

1.2 并网逆变器系统阻抗模型

根据式(5)可知 PLL 引入扰动均与 G_{pll} 、 U_{pdq} 和 U_{pdq}^* 有关, 因此可将图 2 中的 PLL 三部分扰动进行合并, 合并及等效变换后如图 3 所示, 图中, $conj$ 为取共轭环节, G_p 为电压扰动传递函数。

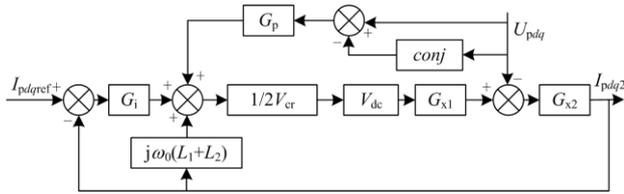


图 3 等效变换

Fig. 3 Equivalent transformation

其中, G_{x1} 、 G_{x2} 如式(6)、式(7)所示。

$$G_{x1} = \frac{1}{LC(s + j\omega_0)^2 + k_c C(s + j\omega_0)V_{dc}/2V_{cr} + 1} \quad (6)$$

$$G_{x2} = \frac{L_1 C(s + j\omega_0)^2 + k_c C(s + j\omega_0)V_{dc}/2V_{cr} + 1}{L_1 C L_2 (s + j\omega_0)^3 + \frac{k_c L_2 C(s + j\omega_0)^2 V_{dc}}{2V_{cr}} + (L_1 + L_2)(s + j\omega_0)} \quad (7)$$

电压扰动传递函数 G_p 如式(8)、式(9)所示。

$$G_p = \frac{G_{pll}}{2} \Delta G \quad (8)$$

$$\Delta G = I_{dq2} [G_i(s) - j\omega_0(L_1 + L_2)] + k_c I_{cdq} + 2V_{cr} D_{dq} \quad (9)$$

由 LCL 并网逆变器主电路稳态工作点处各变量之间的关系, 式(9)可转换成式(10)。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta G &= I_{dq2} G_{\Delta Idq} + U_{dq} \frac{2V_{cr}}{V_{dc}} G_{\Delta Udq} \\ G_{\Delta Idq} &= \frac{2V_{cr}}{V_{dc}} (s + j\omega_0)^3 L_1 L_2 C + (L_1 + L_2) \cdot \\ &\quad \frac{2V_{cr}}{V_{dc}} (s + j\omega_0) - j\omega_0(L_1 + L_2) + \\ &\quad k_c L_2 C (s + j\omega_0)^2 + G_i(s) \\ G_{\Delta Udq} &= \frac{2V_{cr}}{V_{dc}} [(s + j\omega_0)^2 L_1 C + \frac{V_{dc} - k_c}{2V_{cr}} \cdot \\ &\quad (s + j\omega_0)C + 1] \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中, I_{dq2} 、 U_{dq} 分别为 PCC 点并网电流、电压的稳态工作点。

基于图 3, 根据输出阻抗的定义, 可以推出 LCL 型并网逆变器的输出阻抗模型, 如式(11)一式(13)。

$$-I_{pdq2} = \frac{U_{pdq}}{Z_{o1}} + \frac{U_{pdq}^*}{Z_{o2}} \quad (11)$$

$$Z_{o1} = \frac{1}{[1 - G_{x1} G_p] G_o} \quad (12)$$

$$Z_{o2} = \frac{1}{G_{x1} G_p G_o} \quad (13)$$

式中: $Z_{o1}(s)$ 和 $Z_{o2}(s)$ 为并网变流器在两个耦合频率下的输出阻抗; $G_o(s)$ 为不考虑 PLL 的电流增益的传递函数, 具体传递函数表达式如式(14)所示。

$$G_o = \frac{G_{x2}}{1 + V_{dc} G_{x1} G_{x2} [G_i - j\omega_0(L_1 + L_2)] / 2V_{cr}} \quad (14)$$

2 等价输出阻抗及稳定性分析

2.1 频率耦合现象机理

基于频率耦合现象, 当在 PCC 点施加扰动电压 U_{pdq} 时, 会产生一对互为共轭的并网扰动电流 I_{pdq2} 、 I_{pdq2}^* , 扰动电流流经电网阻抗 Z_g 产生对应频率电压扰动信号进而使 PCC 点产生扰动, PCC 点扰动电压与扰动电流的关系式为

$$U_{PCC,pdq} = U_{pdq} - I_{pdq2} Z_g \quad (15)$$

$$U_{PCC,pdq}^* = -I_{pdq2}^* Z_g^* \quad (16)$$

式中: Z_g 为电网阻抗转换到 dq 坐标系的形式; Z_g 、 Z_g^* 互为共轭。

由式(11)可得:

$$-I_{pdq2}^* = \frac{U_{PCC,pdq}^*}{Z_{o1}^*} + \frac{U_{PCC,pdq}}{Z_{o2}^*} \quad (17)$$

结合式(11)、式(15)一式(17)可以得到并网逆变器与弱电网系统的交互关系如图 4。

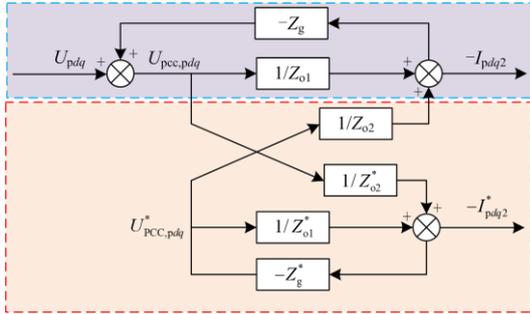


图 4 并网逆变器与电网阻抗交互关系

Fig. 4 Interaction between grid-connected inverter and grid impedance

基于 1.2 节及本节分析表明弱电网下并网逆变器频率耦合现象的机理在于: (1) 由于 PLL 不对称输出的影响, 一个电压信号的激励不仅会产生与自身同频的电流响应, 还会产生其共轭频率的电流, 即并网逆变器形成了单输入双输出的响应特性; (2) 由于电网阻抗的存在, 两个频率的响应电流又会在并网耦合点处产生对应频率的扰动电压, 扰动电压通过 PLL 对控制环节产生影响进而又会对并网电流产生影响, 如此交替循环, 使得两个频率分量相互耦合。

2.2 并网逆变器等价输出阻抗的建立

对图 4 按频率划分, 可划分为两部分: 其中, 紫色部分处于与施加扰动电压 U_{pdq} 对应频率下, 橙色部分处于与 U_{pdq}^* 对应频率下。根据文献[27]两个不同频率的电流扰动输出都来源于同一个闭环系

统, 稳定性相同, 因此可将系统的稳定性分析等价成只对并网电流 I_{pdq} 进行稳定分析。对于并网电流 I_{pdq} 系统, 图 4 中橙色部分可以等效为阻抗 Z_{co} , 且 Z_{co} 与 Z_{o1} 并联共同构成并网电流 I_{pdq} 对应的逆变器系统等价输出阻抗 Z_{eq} , 则 Z_{co} 、 Z_{eq} 的表达式分别为

$$Z_{co} = -\frac{(Z_{o1}^* + Z_g^*)Z_{o2}Z_{o2}^*}{Z_g Z_{o1}^*} \quad (18)$$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_{o1}} + \frac{1}{Z_{co}} \quad (19)$$

由式(12)、式(13)可得

$$\frac{1}{Z_{o1}} = \frac{1}{Z_o} - \frac{1}{Z_{o2}} \quad (20)$$

式中, Z_o 为忽略 PLL 影响时并网逆变器输出阻抗, Z_o 表达式为

$$Z_o = \frac{1}{G_o} \quad (21)$$

将式(20)代入式(19)可得

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_{pll}} \quad (22)$$

式中, Z_{pll} 表示为 PLL 引入的输出阻抗, 其表达式为

$$\frac{1}{Z_{pll}} = -\frac{1}{Z_{o2}} + \frac{1}{Z_{co}} \quad (23)$$

对式(23)分析可知, Z_{pll} 的阻抗幅值大小的变化与 Z_{o2} 阻抗幅值大小一致。

2.3 锁相环对并网逆变器稳定性影响

根据文献[28]对 Nyquist 稳定判据衍变得到的阻抗稳定性判据知, 在强电网下并网逆变器系统稳定的前提下, 弱电网(考虑最恶劣情况, 电网阻抗设置为纯电感 L_g)下并网系统的稳定性判据可转化为: 在含有 Z_g 、 Z_{eq} 的波德图中, Z_g 与 Z_{eq} 幅频特性曲线交接处频率对应的 Z_{eq} 的相位大于 -90° , 则系统稳定, 否则系统不稳定。因此, 弱电网下研究 PLL 对并网逆变器稳定性的影响可以等价成 PLL 对并网逆变器系统等价输出阻抗的影响。图 5 给出了并网逆变器系统 Z_o 、 Z_{pll} 和 Z_{eq} 的波德图。

根据式(22)可知, 并网逆变器的等价输出阻抗 Z_{eq} 可以等效为不考虑 PLL 影响的逆变器输出阻抗 Z_o 和考虑 PLL 影响引入的输出阻抗 Z_{pll} 并联。图 5 中 Z_{eq} 在低频段与 Z_{pll} 走势相近、在高频段与 Z_o 走势相近, 因此, PLL 主要影响并网逆变器输出阻抗低频段频率特性, 由图可知, Z_{pll} 的引入使 Z_{eq} 在低频段幅频特性曲线降低、相频特性曲线小于 -90° 的范围大大扩大, 均严重影响了弱电网下并网系统的

稳定裕度, 因此, 增大 Z_{o2} 阻抗幅值(抑制频率耦合)有助于提升系统稳定性。

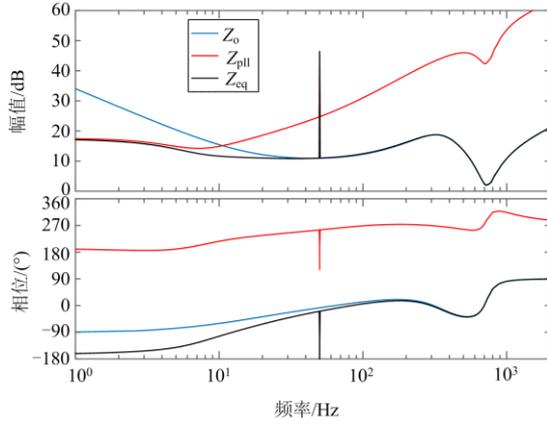


图 5 并网逆变器输出阻抗波德图

Fig. 5 Bode diagram of output impedance of grid-connected inverter

3 抑制锁相环影响的改进控制策略

弱电网下 PLL 受电压扰动的作用造成并网系统出现频率耦合现象对并网变流器稳定性造成影响, 因此, 基于文献[29]的三相 LCL 型并网逆变器电网电压前馈思想提出了 PLL 引入的扰动量前馈的策略来抑制 PLL 对并网系统稳定性的负面影响。

3.1 抑制弱电网下锁相环影响改进控制的提出

由图 3 知因 PLL 影响引入的扰动量为

$$U_p = [U_{pdq} - U_{pdq}^*]G_p \quad (24)$$

结合式(2)、式(3)、式(8)、式(10)、式(24), 可推导得到

$$U_p = \frac{U_{pdq} - U_{pdq}^*}{2} [1 - U_0 G_{pll}(s)] \cdot H_{pll}(s) \Delta G \quad (25)$$

PLL 输出电压 q 轴扰动分量 U_{pq}^f 满足式(26)。

$$jU_{pq}^f(s) = \frac{U_{pdq} + \Delta U_{pdq} - U_{pdq}^* - \Delta U_{pdq}^*}{2} \quad (26)$$

将式(5)代入式(26)得

$$jU_{pq}^f(s) = \frac{U_{pdq} - U_{pdq}^*}{2} [1 - U_0 G_{pll}(s)] \quad (27)$$

结合式(25)、式(27)得

$$U_p = jU_{pq}^f H_{pll} \Delta G \quad (28)$$

由式(28)得到由 PLL 影响引入的扰动电压量 U_p , 本文的改进控制策略是在控制环节处前馈注入 $-G_{th}U_p$ 来抑制 PLL 对并网逆变器稳定性的不利影响(其中 G_{th} 为一阶高通滤波器), 并网逆变器采用改进控制时的小信号框图如图 6。

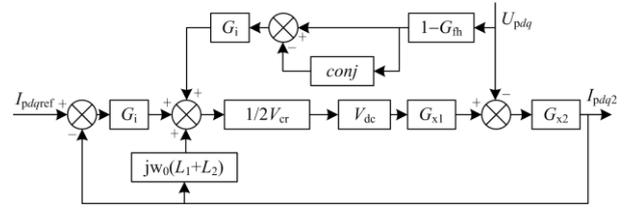


图 6 改进控制下的并网逆变器的小信号模型

Fig. 6 Small signal model of grid-connected inverter under improved control

根据图 6, 结合式(28), 得到本策略的扰动电压前馈补偿量 U_{cp} 为

$$U_{cp} = -G_{th}U_p = -jU_{pq}^f H_{pll} G_{th} \Delta G \quad (29)$$

结合式(11)和图 6 可以得到基于扰动电压前馈补偿后的系统输出阻抗模型 Z_{co1} 、 Z_{co2} 为

$$Z_{co1} = \frac{1}{[1 - G_{x1}G_p(1 - G_{th})]G_o} \quad (30)$$

$$Z_{co2} = \frac{1}{G_{x1}G_p(1 - G_{th})G_o} \quad (31)$$

根据式(13)、式(31), 图 7 给出了采取传统控制、扰动电压前馈补偿控制下的共轭电压 U_{pdq}^* 分量输出阻抗 Z_{o2} 、 Z_{co2} 的波德图。

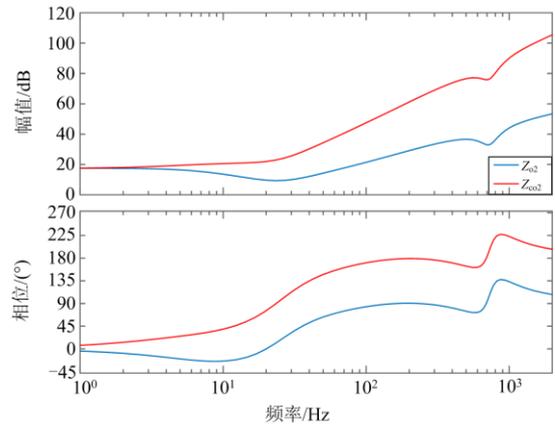


图 7 扰动电压前馈补偿对频率耦合现象的影响

Fig. 7 Influence of the disturbance voltage feedforward compensation on the frequency coupling phenomenon

由图 7 可知, 采取扰动电压补偿方案的 Z_{co2} 的阻抗幅值在全频域明显大于传统控制的 Z_{o2} , 因此采用扰动电压补偿的改进控制策略能够有效抑制耦合现象, 进而抑制 PLL 的影响, 提升并网逆变器稳定性。

由图 3、图 6 可知, 与传统控制的小信号模型对比, 可以看出基于扰动电压补偿的控制策略等价于在电压扰动支路引入了一个低通滤波器 $1 - G_{th}$, 此时 PLL 的闭环传递函数可等效为 $(1 - G_{th})G_{pll}$, 带

宽减小, 从而抑制了弱电网下 PLL 对并网逆变器稳定性造成的负面影响。因此, 高通滤波器 G_{fh} 带宽的设计应以 PLL 带宽和 Z_g 与 Z_{eq} 的交接频率为上限。

3.2 扰动电压前馈补偿方案的实现

基于式(10)、式(29)可以得到电压补偿策略的改进电流控制框图如图 8。

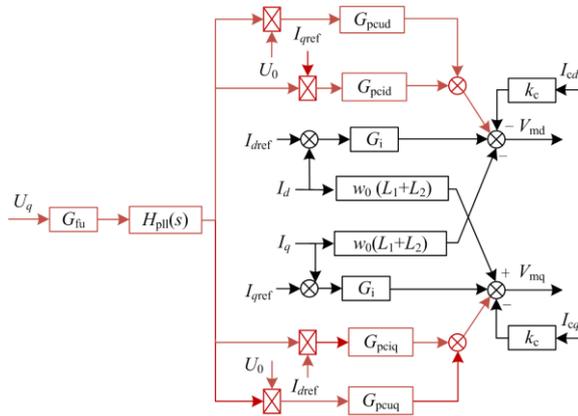


图 8 电压扰动前馈控制方法

Fig. 8 Voltage perturbation feedforward control method

基于理论提出的改进控制策略是扰动电压全前馈补偿, 其含有纯微分环节, 在实际应用中会放大高频噪声且理想微分环节难以实现。图 9 给出了传统控制方法、扰动电压的常数项前馈补偿和全前馈补偿的等价输出阻抗的波德图, 分别为 Z_{eq} 、 Z_{eq_cc} 和 Z_{eq_call} 。

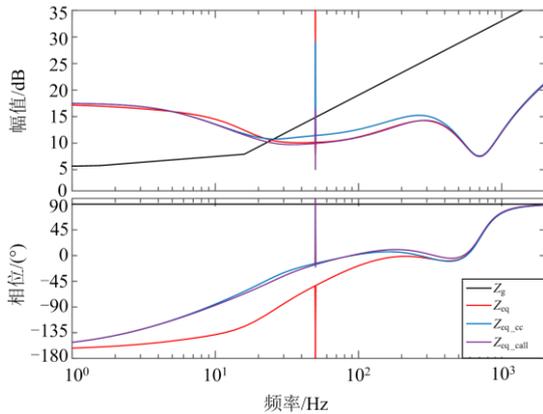


图 9 不同控制方法下等价输出阻抗波德图

Fig. 9 Bode diagram of equivalent output impedance under different control methods

由图 9 可知, 在传统控制系统相位稳定裕度不满足稳定要求时, 扰动电压常数项补偿和全补偿输出阻抗的频率响应都能显著提高系统的相位, 使 Z_g 与 Z_{eq} 幅频特性曲线交接处频率对应的 Z_{eq} 的相位大于 -90° , 系统满足阻抗稳定性判据稳定, 且常数

项扰动电压补偿与全补偿策略相位提升相差不大, 所以常数项扰动电压补偿能很好地提升控制策略的稳定性能。因此, 本文提出的控制策略中仅考虑对 PLL 引入的电压扰动的常数项进行前馈补偿, 此时控制框图中的部分变量变为

$$\begin{cases} G_{pcud} = \omega_0 k_c C \\ G_{pcid} = -L_1 L_2 C \omega_0^3 \\ G_{pciq} = -k_c L_2 C \omega_0^2 + G_i \\ G_{pcuq} = 1 - L_1 C \omega_0^2 \end{cases} \quad (32)$$

4 仿真验证

为了验证本文理论分析的正确性以及所提控制策略的有效性, 从 PLL 带宽、电网强度、频率耦合现象和动态性能影响等方面对传统控制和本文所提出的改进控制并网波形进行对比。按照图 1 的系统框图在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了传统控制和所提控制策略的三相 LCL 型并网逆变器模型, 表 1 为主要系统参数。

表 1 并网逆变器系统参数

Table 1 System parameters of grid-connected inverter

参数	数值	参数	数值
电网频率 f_i /Hz	50	逆变器侧电感 L_1 /mH	3
开关频率 f_s /kHz	10	电网侧电感 L_2 /mH	1
直流侧电压 U_{dc} /V	400	滤波电容 C /μF	50
电网电压 U_g /V	110	电流环 k_{pi} , k_{ii}	3.5, 311
有源阻尼系数 k_c	10	dq 轴电流参考值 i_{dref} 、 i_{qref} /A	30、0

4.1 锁相环带宽变化

图 10 为采用传统控制, L_g 为 6 mH 时 PLL 带宽分别为 10 Hz、30 Hz 时 Z_g 、 Z_{eq} 的波德图, 根据阻抗稳定性判据可以看出当 PLL 带宽为 10 Hz 时

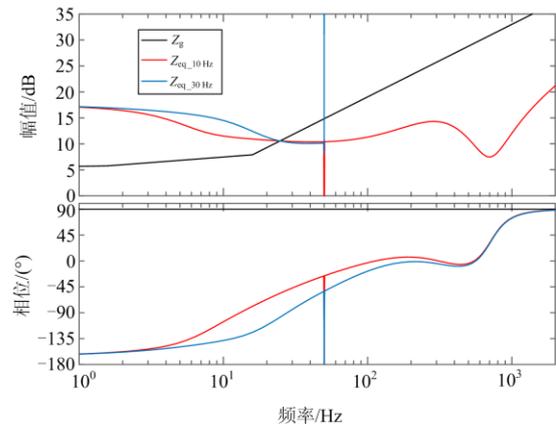


图 10 锁相环带宽变化时的 Z_g 、 Z_{eq} 波德图

Fig. 10 Z_g and Z_{eq} Bode diagram of PLL bandwidth variation

并网系统稳定、PLL 带宽为 30 Hz 时并网系统不稳定。

图 11 为图 10 所对应情形的三相 LCL 型并网逆变器进行 PLL 带宽跳变的并网电流时域仿真波形。0.5 s 前、后 PLL 带宽分别为 10 Hz、30 Hz，从图中看出：PLL 带宽为 10 Hz 时，并网电流波形良好，谐波含量低，并网系统处于稳定状态；当 PLL 带宽突变为 30 Hz 时，并网电流产生畸变、发散，系统最终失去稳定。时域仿真结果与理论判稳分析相符，证明了本文理论分析的正确性。

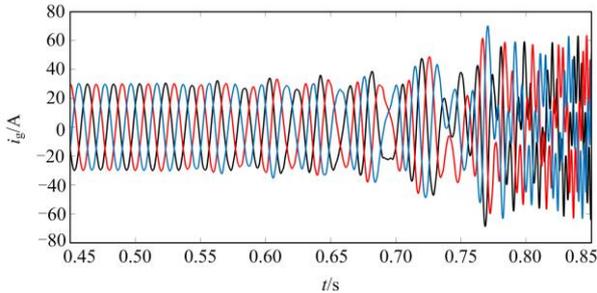


图 11 锁相环带宽跳变时的并网电流波形
Fig. 11 Grid-connected current waveform when the PLL bandwidth jumps

图 12 中， L_g 为 6 mH、PLL 带宽为 30 Hz 时采用改进控制时的 Z_g 、 Z_{eq} 频率特性曲线，由阻抗稳定性判据知此时并网系统稳定。

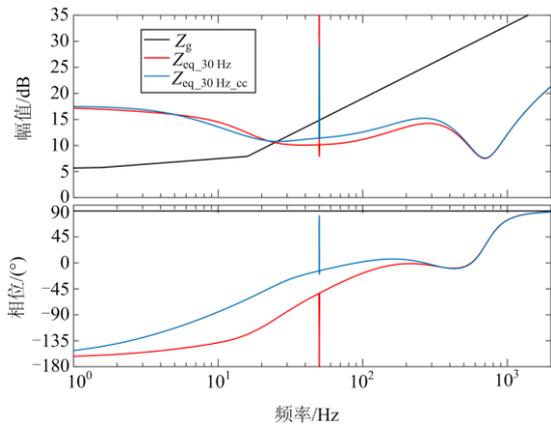


图 12 锁相环带宽为 30 Hz 时传统、改进控制波德图
Fig. 12 Bode diagram of traditional and improved control when PLL bandwidth is 30 Hz

图 13 为图 12 对应情形的并网电流时域仿真波形，波形良好，谐波含量低，表明并网系统处于稳定状态，改进控制策略能够有效改善并网系统稳定性。理论与实际对应，验证了改进控制策略的有效性。

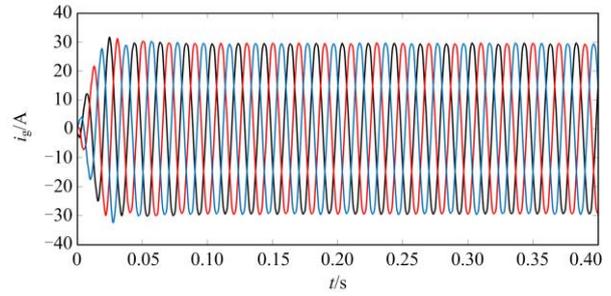


图 13 锁相环带宽为 30 Hz 时采用改进控制并网电流波形
Fig. 13 Improved control grid-connected current waveform adopted when the PLL bandwidth is 30 Hz

4.2 电网强度变化

本文以电网的阻抗值大小表征电网强度，图 14 中有采用传统控制时 PLL 带宽为 30 Hz、 L_g 为 5 mH 时的 Z_g 、 Z_{eq} 的频率特性曲线，根据阻抗稳定性判据可以看出当电网阻抗为 5 mH 并网系统稳定。由 4.1 节知同等情况下， L_g 为 6 mH 并网系统失稳。

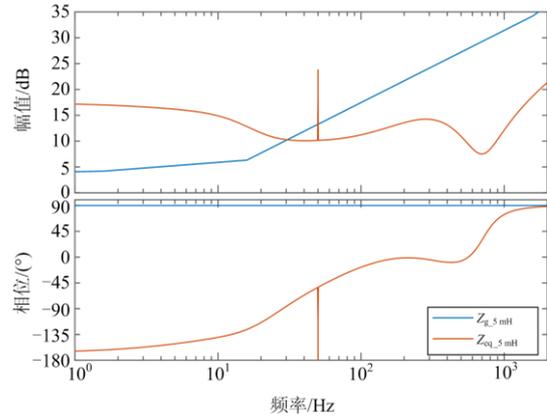


图 14 $L_g=5$ mH 的 Z_g 、 Z_{eq} 波德图
Fig. 14 Z_g and Z_{eq} Bode diagrams of $L_g=5$ mH

图 15 为三相 LCL 型并网逆变器进行电网阻抗跳变时的并网电流时域仿真波形。0.5 s 前、后 L_g 分别为 5 mH、6 mH，从图中看出：在 L_g 为 5 mH 时，并网系统处于稳定状态；当 L_g 突变为 6 mH 时，

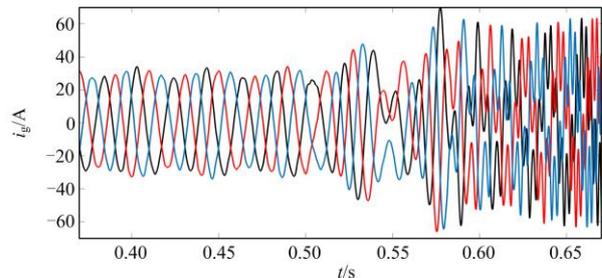


图 15 电网强度跳变时的并网电流波形
Fig. 15 Grid-connected current waveform when power grid strength jumps

并网电流产生畸变、发散, 系统最终变为失稳。时域仿真结果与理论判稳分析相符, 证明了本文理论分析的正确性。

4.3 频率耦合现象的抑制

图 16、图 17 分别为 $L_g=5$ mH 时并网系统的电流控制方式跳变时的并网电流和对应并网电流的谐波含量图。0.5 s 前、后分别采用传统控制和改进控制, 图 17 中 0.5 s 前的波形虽然稳定但含有大量谐波, 0.5 s 后波形良好、谐波含量低。由图 18(a)可以看出, 采用传统控制存在明显频率耦合现象, 由图 18(b)可以看出, 采用改进控制频率耦合现象得到很好的抑制, 系统稳定性得到改善。

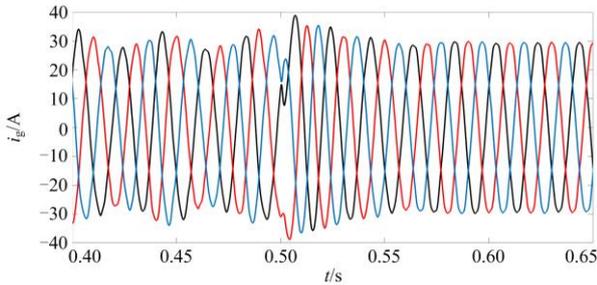


图 16 $L_g=5$ mH 时控制策略突变时的并网电流

Fig. 16 Grid-connected current when $L_g=5$ mH control strategy changes

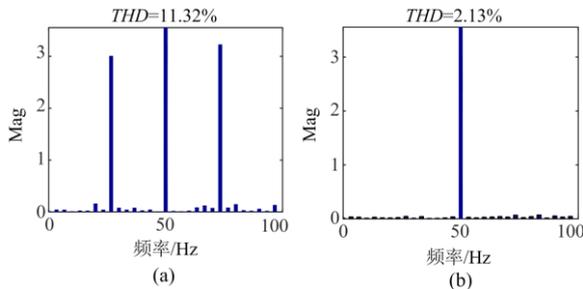


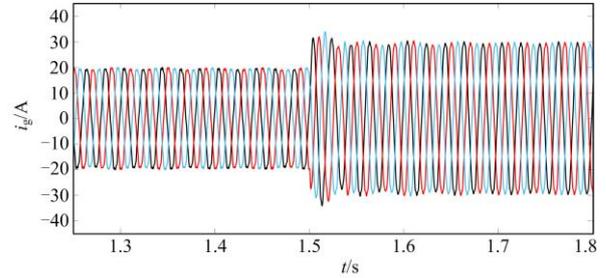
图 17 $L_g=5$ mH 时传统、改进控制并网电流谐波含量

Fig. 17 Harmonic content of traditional and improved control grid-connection current when $L_g=5$ mH

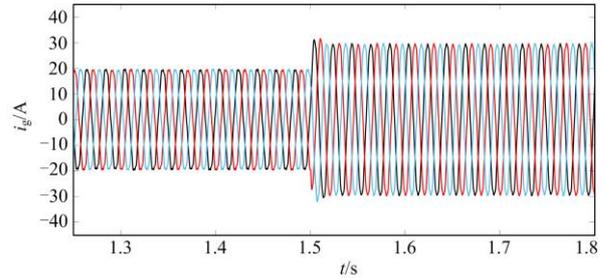
4.4 系统动态性能的影响

某时刻分别在传统控制和改进控制的稳定运行系统中, 将电流参考值 i_{dref} 由 20 A 阶跃至 30 A, 得到并网电流给定阶跃时的时域仿真波形如图 18 所示。图 18(a)为传统控制的并网电流波形, 过渡到稳定的时间为 0.12 s; 图 18(b)为所提改进控制的并网电流波形, 过渡到稳定的时间为 0.04 s。对比图 18(a)、图 18(b)可知, 加入所提改进控制方法后, 系统动态性能没有变差。

因此, 所提控制方法能在不影响动态性能的前提下很好地提升并网稳定性。



(a) 传统控制方法



(b) 改进控制方法

图 18 加入所提改进策略前后的并网电流

Fig. 18 Grid-connected current before and after adding the proposed improved strategy

5 结论

本文利用了复矢量传递函数方法推导出计及 PLL 影响的三相 LCL 型并网逆变器与电网阻抗交互作用的等价输出阻抗模型, 能够很直观地突出 PLL 引入的扰动电压, 采用阻抗稳定性判据分析了 PLL 对并网逆变器稳定性的影响。为了抑制 PLL 对并网逆变器的不利影响, 提出了扰动电压前馈补偿的控制策略。该策略在理论上能够对频率耦合现象进行抑制、等效减小 PLL 带宽, 提高了并网逆变器的稳定性; 在实现上简单、效果显著且可以保留 PLL 的动态响应。本文所采取的阻抗建模方法和控制策略, 不仅适用于并网逆变器的稳定性分析和控制, 同样对于其他并网型设备也具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113.
- [2] 刘增训, 游沛羽, 周勤勇. 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 59-70.
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong. Summary of research on transmission technology suitable for wide area absorption of high proportion new energy system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.

- [3] 阎平, 陈昉, 杜战朝, 等. 能源互联网背景下的两阶段风电有功功率控制[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 89-96.
YAN Ping, CHEN Fang, DU Zhanchao, et al. Two-stage wind power control under the background of energy internet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 89-96.
- [4] 黄景光, 汪潭, 林湘宁, 等. 面向风电消纳的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 110-117.
HUANG Jingguang, WANG Tan, LIN Xiangning, et al. Robust optimal dispatch of regional integrated energy system for wind power consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 110-117.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 邹鹏辉, 张治, 张显立. 高渗透率分布式光伏系统谐波与电压控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 40-45.
ZOU Penghui, ZHANG Zhi, ZHANG Xianli. Harmonic and voltage control of distributed photovoltaic system with high permeability[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 40-45.
- [8] 景皓, 李璠, 卢志刚, 等. 基于主从博弈理论的含分布式发电的主动配电网故障恢复方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 77-84.
JING Hao, LI Fan, LU Zhigang, et al. Active distribution network fault recovery method with distributed generation based on master-slave game theory[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 77-84.
- [9] 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.
- [10] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Analysis and reflection on the Oscillation event of the "August 9" blackout in the UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.
- [11] 欧阳逸风, 邹宇. 弱电网条件下并网逆变器的锁相环静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 74-79.
OUYANG Yifeng, ZOU Yu. Static stability analysis of phase-locked loop in grid-connected inverters under weak grid condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 74-79.
- [12] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 复杂电网环境下基于 DDM-QT1-PLL 的并网同步方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 132-141.
WANG Jiahao, PAN Huan, NA Chunqing. Synchronization method for grid connection based on DDM-QT1-PLL in complex grid environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 132-141.
- [13] 杨苓, 陈燕东, 周乐明, 等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3792-3804.
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Influence of phase-locked loop on small disturbance modeling and stability analysis of three-phase LCL type grid-connected inverter under weak-current network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804.
- [14] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [15] WEN B, DONG D, BOROYEVICH D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26-38.
- [16] 王利超, 于永军, 张明远, 等. 直驱风电机组阻抗建模及次同步振荡影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 170-177.
WANG Lichao, YU Yongjun, ZHANG Mingyuan, et al. Impedance modeling and influence factors of sub-synchronous oscillation for direct-driven wind turbine[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 170-177.
- [17] 王赞程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相 LCL 型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5890-5898.

- WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Modeling analysis of positive and negative sequence impedances of three-phase LCL type grid-connected inverter based on harmonic linearly[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898.
- [18] BAKHSHIZADEH M K, WANG X, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modelling of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6792-6796.
- [19] WANG X, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [20] 高英瀚, 唐芬, 刘京斗, 等. 基于相位补偿和虚拟阻抗优化的 LCL 型并网逆变器改进控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 167-175.
- GAO Yinghan, TANG Fen, LIU Jingdou, et al. Improved control of LCL grid-connected converter based on phase compensation and virtual impedance optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 167-175.
- [21] 王国宁, 杜雄, 邹小明, 等. 用于三相并网逆变器稳定性分析的自导纳和伴随导纳建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3973-3981.
- WANG Guoning, DU Xiong, ZOU Xiaoming, et al. Modeling of self-admittance and adjoint admittance for stability analysis of three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3973-3981.
- [22] 邹小明, 杜雄, 王国宁, 等. 三相并网逆变器频率耦合机理分析及稳定性判定[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 57-63.
- ZOU Xiaoming, DU Xiong, WANG Guoning, et al. Analysis of frequency coupling mechanism and stability determination of three-phase grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 57-63.
- [23] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the influence of phase locked loop on the stability of LCL type grid-connected inverter and parameter design of phase locked loop under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [24] 杜平, 万玉良, 项颂, 等. VSC 逆变器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 44-49.
- DU Ping, WAN Yuliang, XIANG Song, et al. Study on the key parameters of subsynchronous oscillation for the interaction between VSC converter and weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 44-49.
- [25] XU J, XIE S, TANG T. Evaluations of current control in weak grid case for grid-connected LCL-filtered inverter[J]. IET Power Electronics, 2013, 6(2): 227-234.
- [26] 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 the adaptability of grid-connected inverter with complex filter structure phase locked loop to weaker power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2632-2642.
- [27] YANG Y, DU X, WANG G, et al. A q-axis voltage feedforward control method to improve the stability of VSI in a weak grid[C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2017, Beijing, China: 7897-7902.
- [28] 李明, 张兴, 杨莹, 等. 弱电网下基于加权系数的电网电压前馈控制策略[J]. 电源学报, 2017, 15(6): 10-18.
- LI Ming, ZHANG Xing, YANG Ying, et al. Power grid voltage feedforward control strategy based on weighting coefficient in weak current network[J]. Journal of Power Sources, 2017, 15(6): 10-18.
- [29] 阮新波, 王学华, 潘东华, 等. LCL 型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

收稿日期: 2021-05-15; 修回日期: 2021-12-28

作者简介:

刘人志(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网的稳定性; E-mail: 1034787262@qq.com

陈卓(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究电力系统稳定与控制。E-mail: chzh1230@163.com

(编辑 葛艳娜)