

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181355

# 弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性分析及优化

郑征, 黄旭, 杨明, 高龙将, 李斌

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 逆变侧电流反馈控制是一种常见的间接进网电流控制方法, 其相较于直接进网电流控制具有更好的稳定性。但在实际应用中, 并网逆变器常工作在弱电网条件下, 因此并网逆变器的稳定性会大幅降低。以三相 LCL 逆变侧电流反馈并网逆变器为例, 通过频域分析法研究系统稳定性下降的机理, 提出在并网电压比例前馈环节串联二阶广义积分(Second Order Generalized Integrator, SOGI)的控制方案。该方案可以削弱并网电压比例前馈引入的与线路阻抗相关的额外正反馈, 从而提升弱电网下系统稳定性。最后, 搭建了三相并网逆变器仿真模型、实物模型, 验证了该方案的有效性。

**关键词:** 并网逆变器; 逆变侧电流反馈; 弱电网; SOGI; 稳定性

## Stability analysis and improvement for LCL filter grid-connected inverter using inverter-side current feedback

ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, GAO Longjiang, LI Bin

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** The inverter-side current as a feedback parameter is a commonly used type of inverter which uses indirect current control, it has better stability than direct current control. However, in practical applications, the inverter usually works in the weak grid condition, the stability of grid-connected inverter will be greatly reduced. Taking the three-phase LCL inverter-side current feedback grid-connected inverter as an example, this paper analyzes the mechanism of the system stability degradation by using the frequency domain analysis method, and proposes to install a Second-Order Generalized Integrator (SOGI) in the grid voltage feedforward path. This strategy can attenuate the additional positive feedback associated with the impedance, which is introduced by the grid voltage proportional feedback, thereby improving system stability under weak grid. Finally, through the grid-connected inverter model and experiments, the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1804143 and No. 61703144), Key Science and Technology Project of Universities and Colleges of Henan Education Department (No. 17A470010), and Fund of Henan Mine Electrical and Electronic Device and Control Innovation Scientific and Technological Team (No. CXTD2017085).

**Key words:** grid-connected inverter; inverter-side current feedback; weak grid; SOGI; stability

## 0 引言

近年来, 随着化石能源的枯竭及生态环境的恶化, 新能源发电及其控制技术日益受到人们的重视。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助 (U1804143, 61703144); 河南省教育厅高等学校重点科研项目资助 (17A470010); 河南省矿山电力电子装置与控制创新型科技团队基金项目资助 (CXTD2017085)

太阳能、风能等可再生能源构建的分布式发电系统在电网中的所占比例持续增大<sup>[1-7]</sup>。LCL 型并网逆变器作为连接新能源发电系统与电网的关键接口设备受到了广泛重视与研究。目前对于并网逆变器的控制主要有两种控制方案: 1) 直接进网电流控制<sup>[8-9]</sup>。这一控制方法具有良好的静、动态特性, 并且保证了并网功率因数, 但在仅使用单闭环控制时, 由于 LCL 滤波器谐振峰的存在, 系统不能稳定工作, 因此需要引入适当的阻尼, 如电容电流阻尼等<sup>[10-12]</sup>。

2) 间接进网电流控制<sup>[9,13]</sup>。逆变侧电流反馈是常见的间接进网电流控制方法,其可以方便地实现开关纹波电流的衰减率控制,也有利于对逆变器功率开关管进行过流保护。此外,在参数设计恰当的条件下,逆变侧电流单闭环反馈控制是一个稳定系统<sup>[14]</sup>。但目前我国建设的可再生能源基地主要集中在西北等偏远地区,距离负荷中心距离较远,由此带来的线路阻抗和变压器漏感日益使电网表现出弱电网特性<sup>[15-20]</sup>,此时,采用该控制方案的并网逆变器稳定性会受到影响,因此有必要对弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性进行分析优化。

文献[9]提出了逆变侧电流反馈的并网逆变器参数设计方法;文献[13]则提出了逆变侧电流闭环控制的虚拟电阻+电容谐振方法抑制 LCL 逆变器的谐振;文献[21]提出虚拟阻抗法来提升直接进网电流控制的并网逆变器在弱电网条件下的性能;文献[22]提出了具有阻抗主动调节能力的控制策略;文献[23]针对逆变侧电感电流反馈提出了利用改进的高通滤波器来提取谐波分量进行滤波阻尼的控制方法。可见,目前学术界虽然对并网逆变器谐振及弱电网稳定性开展了大量研究工作,但就弱电网下间接进网电流控制逆变器稳定性的研究较少。

本文以逆变侧电流反馈的 LCL 型并网逆变器为研究对象,首先对该逆变器系统进行建模,利用伯德图等工具对系统的稳定性进行分析,得到电网阻抗对系统稳定性的作用规律,据此提出基于二阶广义积分的并网电压前馈策略。该策略可以显著提升弱电网下并网逆变器的稳定性。最后搭建了 5 kW 的仿真、实验平台,验证了所提出控制策略的有效性。

## 1 LCL 并网逆变器系统

### 1.1 并网逆变器结构

三相 LCL 型逆变侧反馈的并网逆变器结构如图 1 所示。

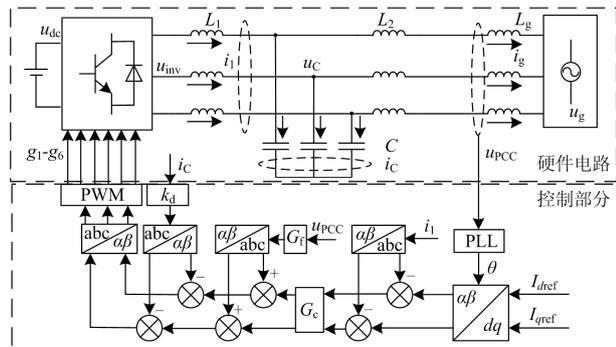


图 1 三相 LCL 型逆变侧反馈并网逆变器

Fig. 1 Control diagram of three-phase inverter-current feedback grid-connected inverter with LCL filter

硬件电路中,逆变器侧电感  $L_1$ 、网侧电感  $L_2$  以及滤波电容  $C$  构成了 LCL 型滤波器; $L_g$  为线路电感(由于线路电阻具有阻尼效果,所以通常假定线路阻抗为纯感性); $i_1$  为逆变器输出电流; $i_g$  为并网电流; $i_c$  为电容电流; $u_{dc}$  为直流侧输入电压(一般由分布式发电系统决定); $u_g$  为网侧电网电压; $u_c$  为电容电压; $u_{pcc}$  为公共耦合点电压( $u_{pcc} = u_g + sL_g i_g$ )。

控制部分通过 Clarke 变换将三相静止坐标系变换到两相静止坐标系,使用逆变侧电流  $i_1$  进行反馈控制,电容电流  $i_c$  作为内环抑制 LCL 谐振尖峰。其中: $G_f$  为并网电压前馈系数,一般取  $G_f = 1/K_{pwm}$ ,  $K_{pwm}$  为逆变桥等效比例增益; $k_d$  为电容电流阻尼系数; $G_c$  为电流控制器; $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$  为参考电流给定值。

两相静止坐标系下的 LCL 型并网逆变器数学模型中  $\alpha$ 、 $\beta$  相不存在耦合关系,但是控制变量为正弦量,此外由于分布式发电系统大多属于弱电网,频率时常发生波动,因此本文控制器采用准比例谐振(Proportional Resonant, PR)控制器<sup>[24]</sup>。

在通常使用中,为了降低低次谐波对控制器的影响,常在准 PR 控制器并联 5 次、7 次、11 次谐波补偿项。准 PR 控制器并联谐波补偿项后的传递函数为

$$G_c(s) = k_p + \sum_{h=1,5,7,\dots} \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_1)^2} \quad (1)$$

其中: $k_p$ 、 $k_r$  为准 PR 控制的比例、谐振系数; $\omega_1$ 、 $\omega_c$  为谐振角频率及控制器带宽。

本文设计的并网逆变器模型参数设置如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the model

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 $u_{dc}$	500 V	逆变器侧电感 $L_1$	2 mH
并网侧线电压有效值 $V_{abrms}$	180 V	网侧电感 $L_2$	0.5 mH
额定功率 $P_{out}$	5 kW	滤波电容 $C$	5 $\mu$ F
比例系数 $k_p$	0.112	开关频率 $f_{sw}$	10 kHz
谐振系数 $k_r$	6.86	阻尼系数 $k_d$	0.15

### 1.2 并网逆变器控制策略

两相静止坐标系下  $\alpha$ 、 $\beta$  轴电流环相互对称,因此仅以  $\alpha$  轴电流环为例进行分析。

$\alpha$  轴并网逆变器控制框图如图 2 所示。

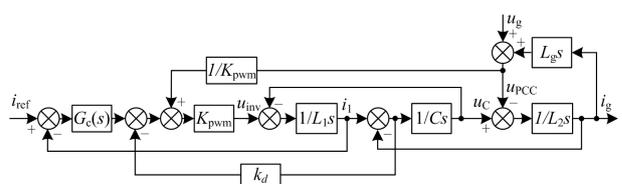


图 2 LCL 型并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of LCL grid-connected inverter

此时  $i_{\text{ref}}$  与  $i_1$  开环传递函数如式(2)所示。

$$G_{i_{\text{ref}}-i_1\text{-op}}(s) = \frac{G_c K_{\text{pwm}} (1 + CL_T s^2)}{[CL_1 L_T s^3 + CL_T K_{\text{pwm}} k_d s^2 + (L_1 + L_2) s]} \quad (2)$$

其中,  $L_1 = L_2 + L_g$ 。

本文使用叠加了 5、7、11 次谐波补偿项的电流控制器, 系统在线路阻抗  $L_g = 0$  mH 的情况下伯德图如图 3 所示。

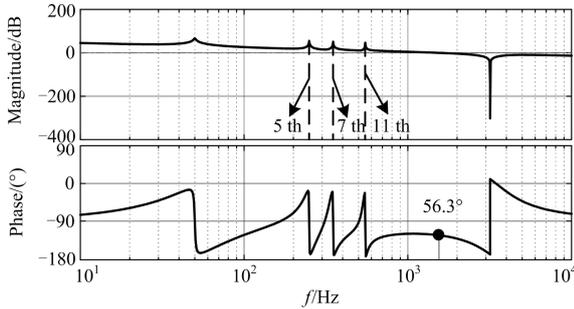


图 3 系统伯德图

Fig. 3 Bode diagram of the system

由图 3 可见, 在没有线路阻抗  $L_g$  影响时, 系统不存在谐振尖峰, 且系统相角裕度达到  $56.3^\circ$ , 具有良好的稳定性。

## 2 弱电网下并网逆变器稳定性分析

逆变器在进行设计时是在理想条件(不存在线路阻抗)下进行参数选取的, 弱电网下线路阻抗的存在直接影响了 LCL 滤波器的性能。

此外, 对图 2 进行等效变换可以得到图 4 所示的等效控制框图, 由图可以发现, 在弱电网情况下, 由于公共耦合点电压  $u_{\text{PCC}}$  包含了入网电流  $i_g$  的信息, 所以并网电压比例前馈控制将额外引入一条附加的与线路阻抗有关的并网电流正反馈环路。

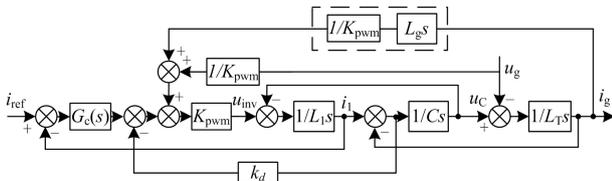


图 4 LCL 型并网逆变器等效控制框图

Fig. 4 Equivalent control block diagram of LCL grid-connected inverter

由式(2)可知, 当线路阻抗  $L_g$  增大时系统的共轭极点迅速左移, 导致相角裕度急剧降低, 严重威胁到并网系统的稳定性。

利用伯德图进一步对  $i_{\text{ref}}$  与  $i_1$  的开环传递函数

进行分析。当  $L_g$  变化时系统的伯德图变化情况如图 5 所示。

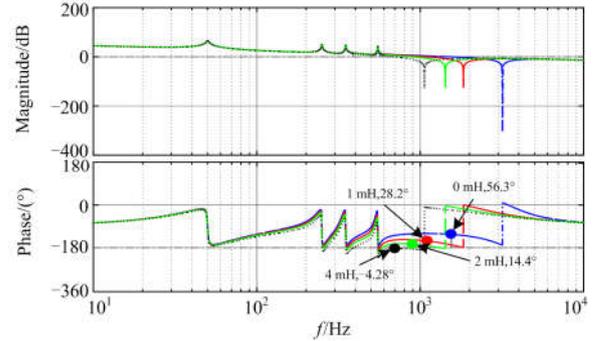


图 5  $L_g$  变化时系统伯德图

Fig. 5 Bode diagram of the system with the different  $L_g$

由伯德图可知, 线路阻抗  $L_g$  对系统的影响主要在中频段。当线路阻抗分别为 0 mH、1 mH、2 mH、4 mH 时, 系统的相角裕度分别为  $56.3^\circ$ 、 $28.2^\circ$ 、 $14.4^\circ$ 、 $-4.28^\circ$ , 即随着  $L_g$  的增加, 系统的相角裕度出现大幅下降, 系统的稳定性被削弱, 在  $L_g$  达到 4 mH 时相角裕度下降至  $-4.28^\circ$ , 系统出现不稳定状态。

此外, 系统的剪切频率也有所变化, 在上述条件下, 系统的剪切频率分别为 1 550 Hz、1 110 Hz、898 Hz、701 Hz, 即随着  $L_g$  的增加, 系统的剪切频率降低, 系统的带宽变窄, 控制环路对谐波的抑制能力及系统的动态响应均受到不利影响。

## 3 基于 SOGI 的优化方法

由以上分析可知, 导致系统稳定性降低的主要原因为: 并网电压比例前馈引入与线路阻抗相关的额外正反馈在整个频段均无衰减响应, 导致系统的开环传递函数相角裕度发生大幅下降而造成系统的稳定性下降。因此提升系统稳定性可以从两个方面入手。

- 1) 降低系统的线路阻抗, 如合理优化线路、减小输电距离、使用漏感更小的变压器等;
- 2) 抑制电网阻抗对系统的作用, 提升弱电网下系统的相角裕度。

由于输电线路长度、变压器漏感的改进空间有限, 因此本文提出在系统的并网电压比例前馈回路串联 SOGI 环节的优化方案。该方案利用 SOGI 所具有的滤波特性使并网电压比例前馈在中频段衰减, 从而降低并网电压比例前馈对系统相角裕度的影响, 最终实现对并网逆变器稳定性的优化。

SOGI 的结构如图 6 所示。

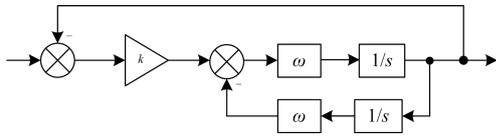


图 6 二阶广义积分器结构图

Fig. 6 Topology of SOGI

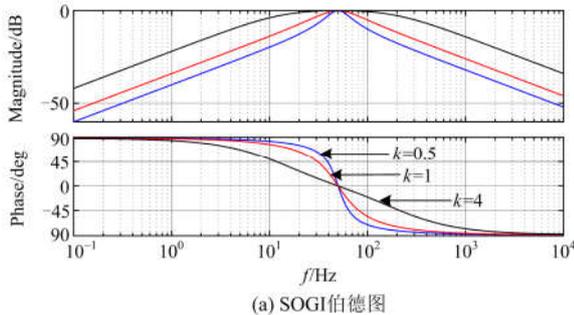
SOGI 的传递函数为

$$G_f(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

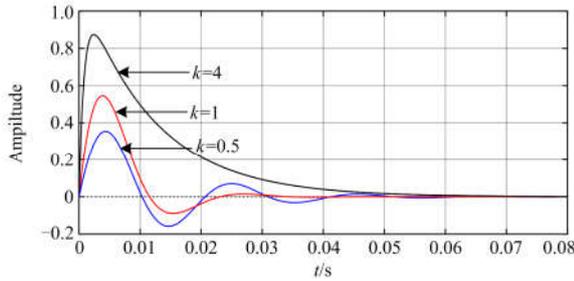
其中： $\omega$  为谐振角频率； $k$  为谐振深度系数。

在本文中，为保证并网电压比例前馈抑制稳态误差的效果，选择谐振频率为电网基波谐振频率即 314 rad/s。

当  $k$  取值变化时，SOGI 的伯德图变化、单位阶跃响应曲线如图 7 所示。



(a) SOGI 伯德图



(b) SOGI 阶跃响应

图 7  $k$  变化时 SOGI 特性曲线

Fig. 7 Characteristics of the SOGI with the different  $k$

由图分析可知，当  $k$  变小时，系统的衰减能力增强，但是系统带宽变窄、动态响应速度变慢。综合考虑后，本文取  $k=1$ 。

将 SOGI 模块  $G_f$  串联在并网电压比例前馈环节，串联后 LCL 并网逆变器控制图如图 8 所示。

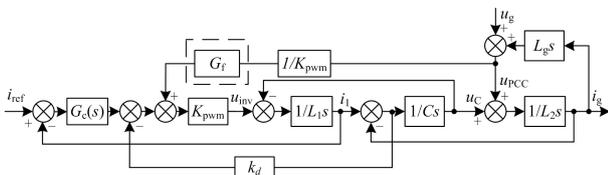


图 8 串联 SOGI 后逆变器控制框图

Fig. 8 Control block diagram of the inverter with SOGI

利用伯德图进行分析验证，仍分别设置线路阻抗为 0 mH、1 mH、2 mH、4 mH，图 9 为使用本文优化方案的系统伯德图。

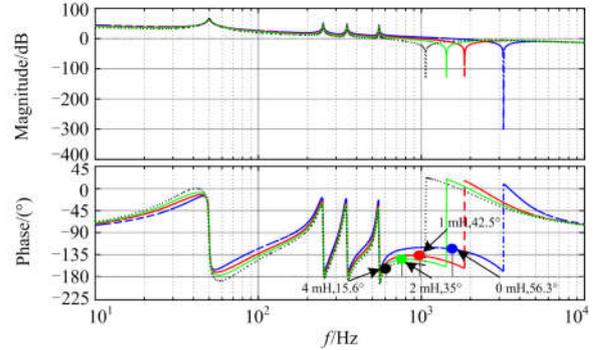


图 9 优化方案系统伯德图

Fig. 9 Bode diagram of the system with optimized strategy

可见，在相同条件下系统的相角裕度分别为 56.3°、42.5°、35°、15.6°，对比图 5，增加 SOGI 后系统的相角裕度大幅增加，系统稳定性得到有效提升。

## 4 仿真、实验验证

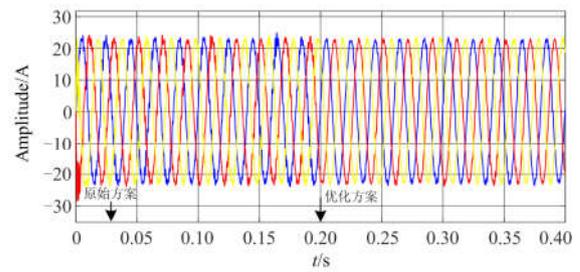
### 4.1 仿真验证

本文基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了三相 LCL 型并网逆变器模型，模型使用参数如表 1 所示。

将线路阻抗分别设置为 2 mH、4 mH，设置系统在 0.2 s 时将控制方案由原始方案切换至本文优化方案，可得到 2 mH 以及 4 mH 两种阻抗条件下不同控制方案的系统并网电流波形对比如图 10 所示。

可以看出，原始方案在线路阻抗为 2 mH 时波形有所畸变，0.2 s 后使用优化方案后波形明显好转；线路阻抗在 4 mH 时，原始方案控制下并网电流出现明显畸变，并网电能质量较差，在使用优化方案控制后，波形畸变情况显著改善。

使用快速傅里叶分析对电流畸变率进行定量分析，分析结果如图 11 所示。原始方案在 2 mH、4 mH 条件下谐波含量分别为 7.38%、29.67%，超过了相



(a) 2 mH 线路阻抗

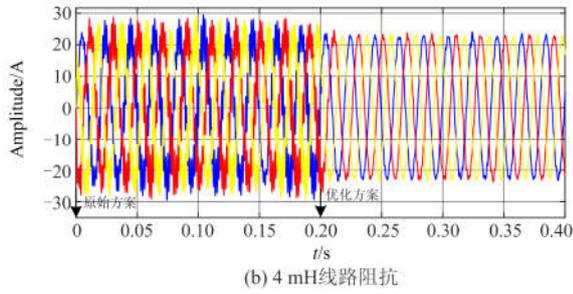
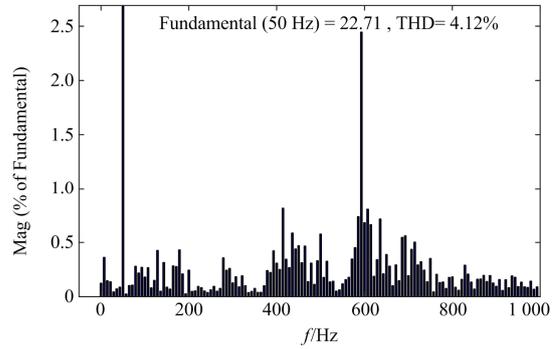


图 10 并网电流对比

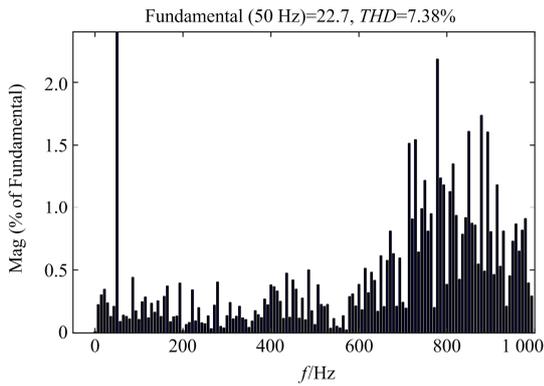
Fig. 10 Comparison of grid current with original and optimized strategy



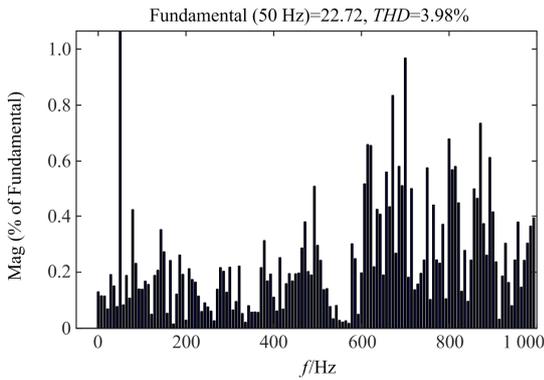
(d) 4 mH线路阻抗优化方案

图 11 并网电流谐波分析

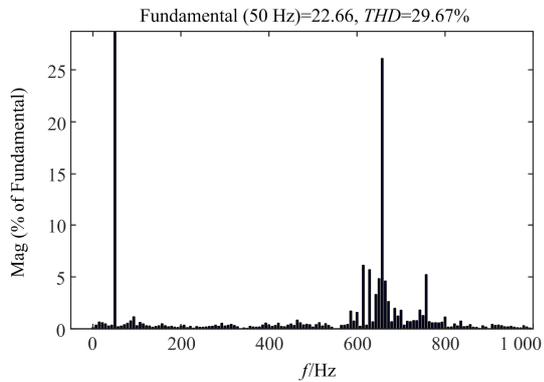
Fig. 11 Harmonics analysis of grid current



(a) 2 mH线路阻抗原始方案



(b) 2 mH线路阻抗优化方案



(c) 4 mH线路阻抗原始方案

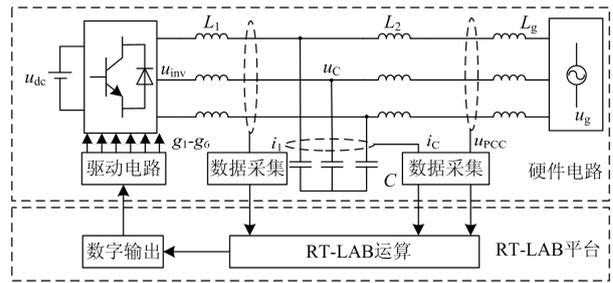
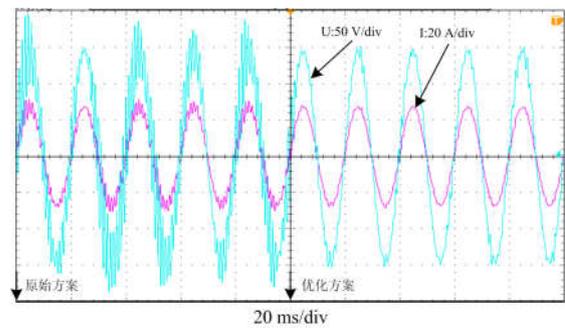


图 12 LCL 并网逆变器试验系统示意图

Fig. 12 Experimental system of LCL filter grid-connected inverter

在线路阻抗分别为 2 mH、4 mH 情况下对两种控制方案进行实验比较, 实验波形如图 13。



(a) 2 mH线路阻抗原始方案

关标准中  $THD < 5\%$  的要求, 而在本文提出的优化方案控制下系统的谐波含量则分别为 3.98%、4.12%, 可见该优化方案对弱电网下提升系统稳定性、抑制电流畸变有着良好的效果。

#### 4.2 实验验证

与仿真参数一致, 搭建了一套 5 kW 的三相并网逆变器。控制部分使用加拿大 Opal-RT 公司推出的 RT-LAB 系统实时仿真平台实现, 利用该系统的 I/O 口实现对外围硬件电路的读取、控制。图 12 为该实验系统示意图。

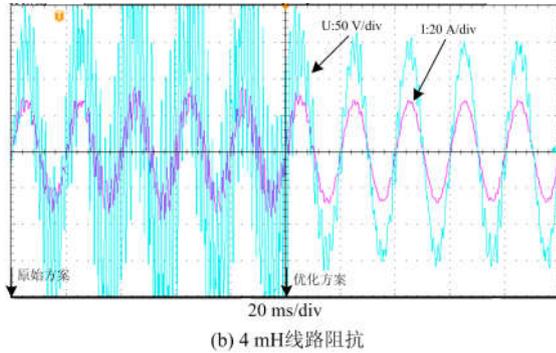


图 13 实验波形对比

Fig. 13 Comparison of experiment waveforms with original and optimized strategy

通过以上分析可以看出在并网电压比例前馈环节串联 SOGI 可以有效增加系统在弱电网条件下的稳定性。

## 5 结论

逆变侧电流反馈控制是一种常见的间接进网电流控制方案。本文首先对使用该控制方案的 LCL 型并网逆变器进行建模, 分析弱电网对逆变器性能的影响, 总结了系统稳定裕度降低的原因, 然后提出了在并网电压比例前馈环节串联广义二阶积分器来提升系统稳定性的方法, 并使用伯德图对其进行验证。最后, 搭建了 5 kW 的并网逆变器仿真、实验模型, 对所提出的方法进行验证, 仿真及实验结果均验证了该方法的有效性。本文对提升弱电网下并网逆变器的稳定性、提升并网电流质量具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 郑征, 黄旭, 杨明, 等. 弱电网下基于复数滤波器的并网电压前馈控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 70-75.  
ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, et al. Grid voltage feedforward control strategy for weak grid based on complex filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 70-75.
- [3] 满灿, 王宝华. LCL 型三相并网逆变器自适应控制策略及其参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 134-142.  
MAN Can, WANG Baohua. Adaptive control strategy and its parameters design of grid-connected inverters with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 134-142.
- [4] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [5] SALMAN S, AI Xin, WU Zhouyang. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [6] 张野, 熊卿, 杨健. 微电网中电压源型逆变器无功优化控制策略研究[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 50-54.  
ZHANG Ye, XIONG Qing, YANG Jian. Research on control strategy for reactive power optimization of voltage-source inverter in micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 50-54.
- [7] 朱世欣, 包继刚, 王维斌. 微电网电压质量控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 22-27.  
ZHU Shixin, BAO Jigang, WANG Weibin. Research on voltage quality control strategy in microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(10): 22-27.
- [8] DANNEHL J, LISERRE M, FUCHS F. Filter-based active damping of voltage source converters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1532-1541.
- [9] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚, 等. 逆变器侧电流反馈的 LCL 滤波并网逆变器参数设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 119-124.  
KAN Jiarong, XIE Shaojun, WU Yunya, et al. Parameter design for LCL filter grid-connected inverter using inverter-side current feedback strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 119-124.
- [10] LISERRE M, BLAABJERG F, HANSEN S. Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1291.
- [11] 黄亚申. 并网逆变器谐振机理及抑制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
HUANG Yashen. Research on resonance mechanism and suppression of grid-connected inverter[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

- [12] 刘飞, 查晓明, 段善旭. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 110-116.  
LIU Fei, ZHA Xiaoming, DUAN Shanxu. Design and research on parameter of LCL filter in three-phase grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 110-116.
- [13] 方刚, 杨勇, 卢进军, 等. 三相光伏并网逆变器电网高阻抗谐振抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 109-116.  
FANG Gang, YANG Yong, LU Jinjun, et al. Resonance suppression method of high impedance power grid for three-phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 109-116.
- [14] 王要强, 吴凤江, 孙力, 等. 带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 34-39.  
WANG Yaoqiang, WU Fengjiang, SUN Li, et al. Control strategy for grid-connected inverter with an LCL output filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 34-39.
- [15] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [16] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [17] 袁小平, 胡秀娟, 孙英洲, 等. 基于加窗傅里叶变换的弱电网阻抗测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 96-101.  
YUAN Xiaoping, HU Xiujuan, SUN Yingzhou, et al. A weak grid impedance detection method based on windowed Fourier transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 96-101.
- [18] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.  
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [19] 李赞, 程洋. 多机并联光伏逆变器系统谐振抑制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 47-51.  
LI Yun, CHENG Yang. Resonance suppression strategy for multi-parallel photovoltaic inverter system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 47-51.
- [20] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.  
HE Yaqing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on stability of the improved control strategy for photovoltaic inverters[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [21] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.  
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [22] 陈新, 张旸, 王赞程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.  
CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567.
- [23] 韩刚, 蔡旭. LCL 并网变流器反馈阻尼控制方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 72-78.  
HAN Gang, CAI Xu. Study on feedback damping control methods of grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 72-78.
- [24] 冯玉. 三相光伏并网系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
FENG Yu. Research of three-phase photovoltaic grid-connected system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2018-12-21

作者简介:

郑征(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制; E-mail: zhengzh@hpu.edu.cn

黄旭(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网发电技术; E-mail: huangxutongxue@163.com

杨明(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网发电技术。E-mail: yangming0391@163.com

(编辑 葛艳娜)