

DOI: 10.7667/PSPC170253

电网电压不平衡及谐波状态下的并网逆变器控制策略

叶吉亮, 李 岚, 刘海霞, 王宇龙

(电气与动力工程学院(太原理工大学), 山西 太原 030024)

摘要: 为了提高并网逆变器在电网电压不平衡及谐波状态下的适应能力, 使其能够输出高质量的并网电流, 需对传统并网逆变器控制策略进行改进。以 $\alpha\beta$ 坐标系下 LCL 型并网逆变器模型为研究对象, 提出一种基于准比例谐振(QPR)和电网电压前馈的控制策略。首先, 分析了并网电流与其给定值和电网电压之间的关系, 得出稳态误差及扰动分量产生的原因。然后, 通过 QPR 控制策略来实现并网电流的无静差控制, 引入电网电压前馈控制来抑制电网扰动对并网电流的直接影响。同时, 为了提高传统锁相环在电网电压非理想情况下锁相精度及谐波抑制能力, 对传统锁相环做进一步改进, 以提高锁相环抗扰能力。最后, 在 Matlab/Simulink 中进行仿真验证, 仿真结果表明该控制策略能够在电网电压不平衡及谐波状态下得到高质量的并网电流, 使逆变器能高效稳定运行, 验证了该控制方法的有效性和正确性。

关键词: 电网电压不平衡; LCL 并网逆变器; QPR 控制器; 电网电压前馈; 改进型锁相环

Control strategy of grid-connected inverter under unbalanced and harmonic voltage condition

YE Jiliang, LI Lan, LIU Haixia, WANG Yulong

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the adaptability of the grid-connected inverter under the unbalanced and harmonic voltage condition and make it produce high quality grid-connected current, it is necessary to improve the traditional grid-connected inverter control strategy. This paper focuses on the model of LCL grid connected inverter in a $\alpha\beta$ coordinate system, and presents a control strategy of Quasi Proportional Resonant (QPR) and grid voltage feedforward. Firstly, the paper analyzes the relationship between the grid-connected current and its given value & grid voltage to get the reason why the steady-state error and disturbance component perturbation component produced. Then, a QPR control strategy is introduced to realize the zero-steady-state error control of grid-connected current and the voltage feedforward control is added to suppress the direct effect of grid disturbance on grid-connected current. At the same time, an improved phase-locked loop control strategy is also introduced to improve the accuracy and the ability of harmonic suppression of traditional one under non-ideal grid voltage state, thereby enhancing phase-locked loop anti-interference. Finally, the simulation results based on Matlab/Simulink show that the proposed control strategy not only gets high-quality grid-connected current under the status of unbalanced and harmonic grid voltage, but also ensures the efficient and stable operation of the inverter, verifying its validity and correctness.

Key words: unbalanced grid voltage; LCL grid-connected inverter; QPR controller; grid voltage feed-forward; improved phase-locked loop

0 引言

在新能源发电系统和电网能量变换装置中, 并网逆变器起着举足轻重的作用, 常常作为一个重要接口用于将直流电能转变为高质量的交流电能送入电网。逆变器可靠稳定的工作, 对系统安全、稳定和高质量运行起着关键作用^[1-2]。理想情况下, 合理

设计逆变器的控制策略可以很容易达到系统的并网要求。然而, 实际电网中总是含有一定量的谐波成分, 若对此部分不加以处理将使并网电流谐波含量较高; 同时, 电网电压不可避免地出现波动或者短时故障, 导致电压不平衡, 从而引起三相并网电流不平衡使并网电流难以达到并网要求^[3-4]。因此, 研究不平衡电网电压及谐波下的并网逆变器控制策略

具有重要意义。

不平衡电网电压及谐波下并网逆变器关键技术主要包括：①并网电流环控制技术；②相位同步技术^[5-6]。在并网电流环控制中，用于跟踪电流指令的控制策略，从最初采用正序同步旋转坐标系下，单个PI控制器同时跟踪正序和负序电流，到后来采用双同步旋转坐标系下的双电流环控制来实现正负序电流的独立控制^[7]，虽然提高了控制精度但也增加了系统的复杂性，并且在同步旋转坐标系下的电流控制，需要复杂的坐标变换和解耦运算，这导致系统的动态性能恶化。基于静止坐标系的控制策略能够避免旋转坐标变换，计算量小，且坐标轴上的变量相互独立无需解耦计算，简化了控制系统结构，具有时延小、动态性能好的特点。在并网逆变系统中，相位的同步通常采用锁相环来实现。如果电网电压的相位信息获取不准确，就会导致逆变器输出电流和电网电压之间出现一定的相位差，进一步使无功功率增加，影响系统稳定，严重时不能达到并网控制目标所要求的有功功率，逆变器网侧输出电流增大，最终使系统崩溃设备损坏。因此，准确的电网电压相位信息提取决定着并网逆变系统性能的好坏。在实际应用中，为了锁相环在非理想电网电压下仍能快速、准确地检测出电网相位，需要对传统锁相环进行改进^[8-9]。

1 三相 LCL 并网逆变器模型

图1为三相LCL并网逆变器电路模型及控制示意图，其中LCL滤波器用于滤除高频开关谐波，由逆变器侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 以及滤波电容 C 组成^[10]。由于LCL滤波器自身存在谐振尖峰问题，影响并网逆变器的稳定性，为保证并网逆变器稳定工作，需要对该谐振尖峰进行有效阻尼^[11-12]。采用电容电流负反馈控制来虚拟阻尼电阻的有源阻尼，不仅能够避免电阻上的损耗，而且电路实现也较为简单，因此，在LCL型并网逆变器中得到广泛应用^[13]。 G_i 为电流控制器传递函数， K_{pwm} 为逆变桥比例系数， H_{ug} 为电压前馈系数， H_{ic} 为电容电流反馈系数。

2 电网电压对并网电流影响机理分析

由于三相LCL并网逆变器模型在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下， α 轴和 β 轴结构相互独立且对称。为阐述方便，选取 α 轴模型进行分析。电容电流负反馈及电网电压前馈下 α 轴LCL并网逆变器控制框图如图2所示。

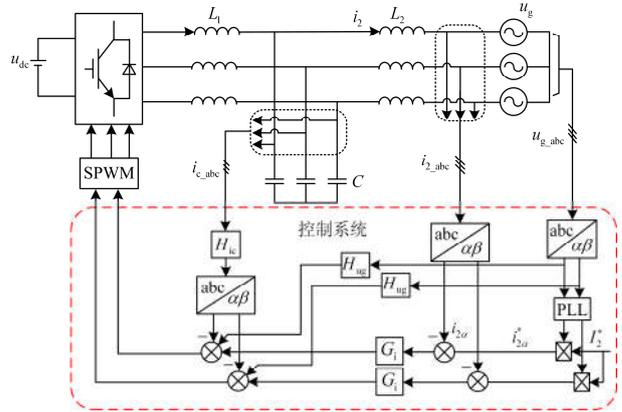


图1 三相并网逆变器主电路及其控制示意图

Fig. 1 Main circuit and its control diagram of three-phase grid-connected inverter

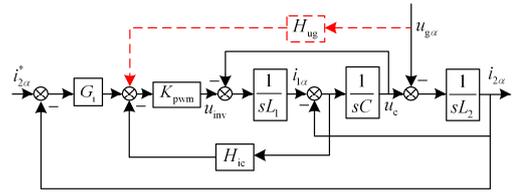


图2 α 轴LCL并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control diagram of α -axis LCL grid-connected inverter

在不考虑电压前馈时，并网电流表达式为

$$i_{2\alpha} = \frac{G_i K_{pwm}}{D(s)} i_{2\alpha}^* - \frac{s^2 L_1 C + s C K_{pwm} H_{ic} + 1}{D(s)} u_{g\alpha} \quad (1)$$

其中：

$$D(s) = s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C K_{pwm} H_{ic} + s(L_1 + L_2) + G_i K_{pwm}$$

从式(1)可以看出， α 轴下三相LCL并网逆变器模型是一个双入单出系统。并网电流由两部分构成：①并网电流给定值作用分量；②电网波动引起的电流扰动分量。其中第一部分为最终的跟踪目标，第二部分是所要抑制的扰动分量。在三相三线制系统中非理想电网电压包括正序分量、负序分量和电网中的谐波成分，这些量都会在并网电流中直接产生对应的电流响应。其中，并网电流稳态误差主要受电网电压正序基波分量影响，并网电流的不平衡由负序基波分量造成，谐波分量主要引起并网电流的畸变。为了保证逆变器在非理想电网环境下仍能够高效、稳定、可靠地工作，必须采取对应的控制策略，消除稳态误差、抑制谐波和负序分量的影响。

3 控制方法

3.1 并网电流的稳态误差消除

传统的PI控制器传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

从式(2)可知, PI 控制器是一个一阶系统, 在电压基波频率处增益有限, 在跟踪正弦信号时, 会出现偏差。

与 PI 控制器不同, PR 控制器是一个二阶系统, 传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (3)$$

基波频率处增益为

$$G_{PR}(j\omega_0) = \sqrt{K_p^2 + \left(\frac{2K_r \omega_0}{-\omega_0^2 + \omega_0^2}\right)^2} \quad (4)$$

由式(4)可知, PR 控制器在特定频率处的谐振作用使得该频率处增益趋于无穷大, 可以实现特定频率正弦信号的无静差控制^[14]。因此, 相比于 PI 控制器, PR 控制器更适合并网逆变器的电流控制。然而, 无穷大的增益会给系统的稳定性带来负面影响, 并且实际的电网频率会存在一定范围的波动, 在非特定频率处增益将显著下降, 无法实现无静差控制的目的。采用准比例谐振控制器(QPR)形成闭环控制可有效解决这些问题, 既保持了 PR 控制器高增益的优点, 又增大了带宽^[15-17]。

准比例谐振控制器传递函数表达式为

$$G_{QPR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (5)$$

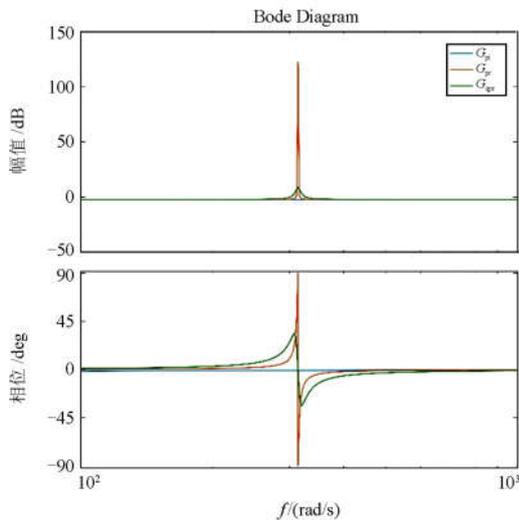


图3 控制器频率特性伯德图

Fig. 3 Bode diagram of frequency characteristics of controllers

主要参数: 谐振系数 K_r 、谐振带宽 ω_c 和比例系数 K_p 。假设电网频率波动为 $\Delta f = \pm 0.5$ Hz, 为了使控制器在频率波动时仍能够获取足够的增益, 常取 $\omega_c = 2\pi\Delta f = \pi$ rad/s 为系统的带宽。

在实际应用中, 为了抑制主要谐波分量对并网电流的影响, 需要对电流中的 5 次、7 次主要谐波分量进行补偿控制, 式(6)为补偿控制器传递函数, 图 4 为 QPR 控制器的 h 次谐波补偿结构框图。

$$G_c = \sum_{h=5,7} \frac{2K_{th} \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (6)$$

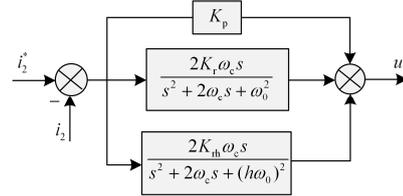


图4 QPR 控制器的 h 次谐波补偿结构

Fig. 4 h -th harmonic compensation structure of the QPR controller

补偿器的主要作用就是在谐波频率 $h\omega_0$ 附近获得高增益, 使得该补偿项只对频率为 $h\omega_0$ 及其附近频段的信号响应, 减小这部分信号与给定信号之间的误差。

3.2 电网电压前馈控制

上节叙述的电流闭环控制策略, 主要是通过增加环路增益的方式来抑制谐波分量和不平衡电流分量。较高的环路增益, 势必会降低系统的动态性能。为了对电网电压扰动起到更为直接有效的抑制作用, 引入电网电压前馈控制^[18-19]。电网电压前馈控制策略是直接对扰动源进行采样, 并送入到逆变器的调制波中, 实现对扰动源实现补偿的一种控制方法, 该方法可以有效改善系统对扰动的响应, 且不改变系统的环路增益。当引入电压前馈后, 电网电流与电网电压无关, 系统可以看作单入单出系统, 可以实现独立控制。同时, 前馈控制的引入可以有效增大系统的输出阻抗, 减小电网电压背景谐波对并网电流的影响。

将图 2 进一步等效变换可得图 5。

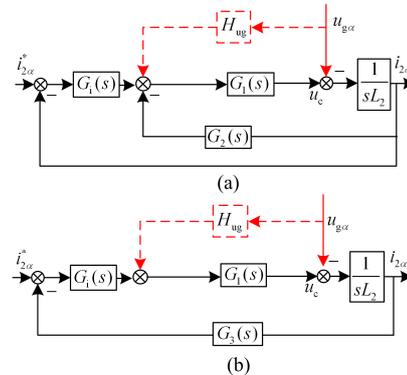


图5 电网电压前馈等效结构图

Fig. 5 Equivalent structure diagram of grid voltage feedforward

其中:

$$G_1(s) = \frac{K_{pwm}}{s^2 L_1 C + s C K_{pwm} H_{ic} + 1} \quad (7)$$

$$G_2(s) = \frac{s L_1}{K_{pwm}} \quad (8)$$

$$G_3(s) = 1 + \frac{s L_1}{K_{pwm} G_1(s)} \quad (9)$$

若使电网电压扰动分量得到完全补偿, H_{ug} 应满足式(10)。

$$u_{g\alpha} H_{ug} G_1(s) - u_{g\alpha} = 0 \quad (10)$$

由式(10)可得

$$H_{ug} = \frac{1}{G_1(s)} = \frac{1}{K_{pwm}} + s C H_{ic} + \frac{s^2 L_1 C}{K_{pwm}} \quad (11)$$

考虑到电网电压谐波主要为 5 次、7 次谐波, 取 $H_{ug} = 1/K_{pwm}$ 电路较容易实现, 且比例前馈无时延, 能够快速响应电网扰动。

3.3 并网同步控制策略的研究

在逆变器并网系统中, 快速、准确的相位检测是有效控制的前提。理想情况下电网电压仅含正序分量, 因此, 理想电网电压下同步相位检测的实质就是对电网正序电压同步相位的提取, 采用传统的锁相环技术就能快速准确地跟踪电网电压相位。然而, 实际中电网电压不可能时常处于理想状态下, 为了能在电网电压非理想情况下获得准确的相位信息, 就必须对传统锁相环进行改进。本文在传统锁相环的基础上引入前置滤波器技术, 能够有效解决传统锁相环在电网电压畸变和不对称情况下失锁的问题, 同时, 其动态性能和谐波抑制方面也有着很大的改善。

基于前置滤波的锁相环原理如图 6 所示, 前置滤波器用于三相电网电压的滤波及提取基波正序分量, 并将基波正序分量送入锁相环信号输入端, 这样能够有效减小负序分量和谐波成分对锁相环的影响。

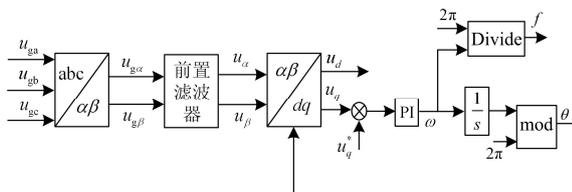


图 6 基于前置滤波的锁相环原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the phase-locked loop based on the pre-filter

由于通用二阶复矢量滤波器在电网电压基波负序分量处增益为 0, 基波正序分量处增益为 1 且

无相移, 因此, 采用通用二阶复矢量滤波器可以很好地消除基波负序分量, 无失真地提取电网电压基波正序分量。

通用二阶复矢量滤波器表达式为

$$G_f(s) = \frac{\xi \delta \omega_0 (s + j \omega_0)}{s^2 + 2 \xi \delta \omega_0 s + (\delta \omega_0)^2} \left(1 + j \frac{1 - \delta^2}{2 \xi \delta} \right) \quad (12)$$

式中: ξ 为阻尼比, 通常取 0.707; δ 为补偿系数, δ 取值越大, 通用二阶复矢量滤波器对高频谐波抑制能力越差, 但获得的动态性能却越好。关于通用二阶复矢量滤波器的具体实现可参考相关文献^[1]。

4 仿真分析

为了验证控制方法的有效性和准确性, 在 Matlab/Simulink 中搭建三相 LCL 型并网逆变器仿真模型, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 LCL 并网逆变器仿真参数

Table 1 Simulation parameters of LCL grid-connected inverter

仿真参数	数值	仿真参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	700	有功功率 P/kW	20
网侧相电压 U_g/V	220	基波频率 f/Hz	50
逆变器侧滤波电感 L_1/mH	1.2	载波频率 f_{sw}/kHz	10
电网侧滤波电感 L_2/mH	0.3	比例系数 K_p	0.6
滤波电容 $C/\mu F$	5	谐振系数 K_r	8

图 7 分别为三相不平衡电网电压波形图、传统锁相环相位波形图和改进后锁相环相位波形图。由图 7 可知, 在 A 相和 C 相电压降低或者升高的情况下, 传统锁相环提取的相位信息存在波动, 而加入前置滤波器之后的改进型锁相环, 将不受电网电压不对称的影响, 能够准确地提取相位信息。

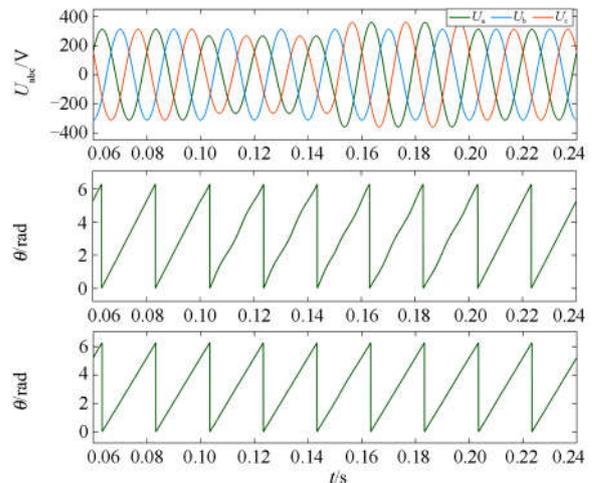


图 7 电网电压不平衡下 2 种锁相环的相位图对比

Fig. 7 Phase graph comparison of two phase-locked loops under unbalanced grid voltage

图8分别为含有5、7次谐波时的电网电压波形、传统锁相环相位波形图和和改进后锁相环相位波形图。由图8可知,当电网电压谐波含量高时传统锁相环提取的相位抖动频率更加严重,而有前置滤波器的改进型锁相环,对谐波分量有很好的抗扰能力,相位提取时基本不受谐波的影响。

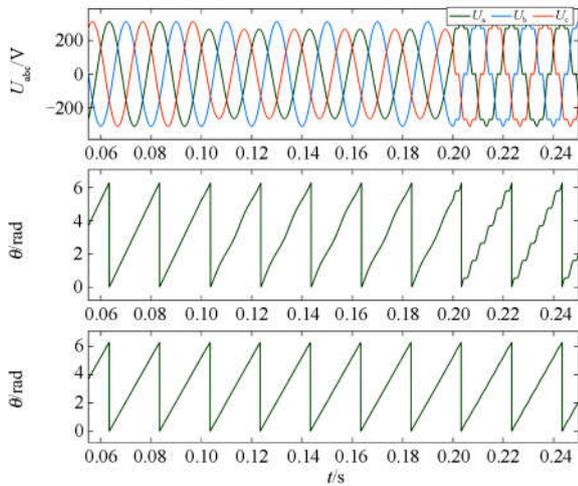


图8 电网电压含有5、7次谐波下2种锁相环的相位图对比
Fig. 8 Phase graph comparison of two phase-locked loops under grid voltage containing 5th and 7th harmonics

图9分别为采用QPR电流控制下的并网电流参考值与实际值对比图和 $\alpha\beta$ 轴下的误差电流。根据图9可知,采用QPR电流控制器能够实现并网电流无静差控制,逆变器输出电流能够完全跟踪参考值,达到满意的控制效果。

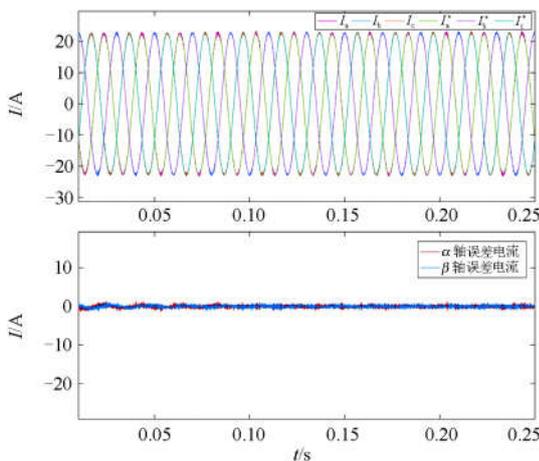


图9 并网电流参考值与实际值的对比

Fig. 9 Comparison between reference value and real one of grid-connected current

图10为A相并网电流FFT分析,图10(a)为不

加电压前馈及谐波电流补偿时A相并网电流频谱图, $THD=6.70\%$ 大于IEEE Std. 929-2000和IEEE Std.1547-2003给出的并网电流总谐波含量小于5%的标准,不能满足并网要求;当采用电压前馈控制及谐波电流补偿后 $THD=2.13\%$,如图10(b)所示,满足并网标准。说明采用电网电压前馈控制及谐波电流补偿能够有效地抑制谐波及不平衡分量对并网电流的影响。

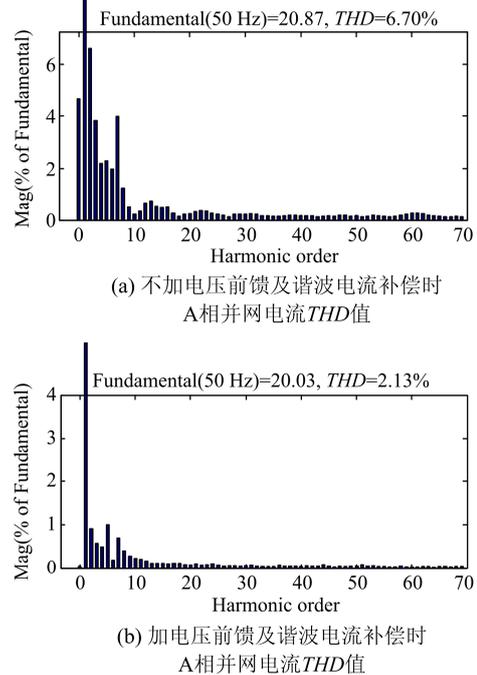


图10 A相并网电流FFT分析

Fig. 10 FFT analysis of phase A grid-connected current

图11为电网电压稳定时,1/2的A相电网电压基波分量与并网电流波形图,可以看出在电网电压不平衡及谐波下,并网电流与电网电压基波分量是同频同相的正弦波,逆变器能够实现单位功率因数并网。

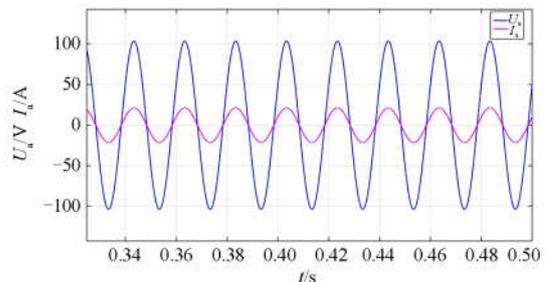


图11 A相电网电压和并网电流仿真结果

Fig. 11 Simulation results of A phase grid-connected voltage and current

5 结论

本文提出一种基于 QPR 和电网电压前馈的控制策略, 仿真结果表明, 该控制策略能够有效地跟踪电流给定值, 实现并网电流的无静差控制。同时, 电压前馈的引入对并网电流抗扰性能有着很好的改善, 实现了电流的独立控制。针对传统锁相环在非理想电网电压下不能快速准确提取电网电压相位的问题, 本文也进行了相应控制策略的改进。引入具有前置滤波器的锁相环控制, 通过前置滤波器滤除电网电压中的负序分量和谐波分量, 无失真地提取出电压中的正序基波分量, 用于锁相控制, 进而使并网电流相位紧紧跟随电网相位变化, 始终保持与电网电压同频同相, 实现单位功率因数并网。

参考文献

- [1] 李巍巍. 三相 LCL 型并网逆变器中电网电压引起的谐波和不平衡电流抑制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [2] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.
QIN Peng, CUI Guozhu, GUO Changlin, et al. Impact of distributed photovoltaic generation on power quality in distribution network and analysis of maximum integration capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 145-150.
- [3] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波谐振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(2): 108-112.
TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo. Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(2): 108-112.
- [4] 王学华, 阮新波, 刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 7-14.
WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei. Control strategy for grid-connected inverter to suppress current distortion effected by background harmonics in grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 7-14.
- [5] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SI Tuqin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [6] 殷进军, 刘邦银, 段善旭. LCL 滤波并网逆变器双环控制参数设计与优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 123-128.
YIN Jinjun, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. Parameters design and optimization of dual-loop controller for grid connected inverters with LCL filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 123-128.
- [7] SONG H S. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [8] 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.
- [9] 王万宝, 张犁, 胡海兵, 等. 三相电压不平衡条件下改进的锁相技术[J]. 电力电子技术, 2013, 47(7): 17-20.
WANG Wanbao, ZHANG Li, HU Haibing, et al. A new phase lock technology for unbalanced three-phase grid[J]. Power Electronics, 2013, 47(7): 17-20.
- [10] 金亮亮, 周荔丹, 姚钢, 等. 适用于并网逆变器的新型 LCL 滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 1-8.
JIN Liangliang, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. A novel LCL filter adopted in grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.
- [11] 郭小强, 邬伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28, 19.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28, 19.
- [12] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. 单相 LCL 型并网逆变器功率控制及有源阻尼优化方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 144-154.
ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A single-phase grid-connected power control and active damping optimization strategy with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 144-154.
- [13] 王晗, 彭思敏, 张建文, 等. LCL 并网逆变器不同电流反馈的控制稳定性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8):

- 1449-1455.
WANG Han, PENG Simin, ZHANG Jianwen, et al. Control stability study of LCL grid connected inverter with different current feedback[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1449-1455.
- [14] 苑晓焘, 荆龙, 梁建钢, 等. 基于比例谐振调节器的 PWM 整流器不平衡控制[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 6-9.
YUAN Xiaoyao, JING Long, LIANG Jiangang, et al. Unbalanced control of PWM rectifiers based on proportional resonant regulator[J]. Power Electronics, 2015, 49(1): 6-9.
- [15] 王萌, 夏长亮, 宋战锋, 等. 不平衡电网电压条件 PWM 整流器功率谐振补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 46-53.
WANG Meng, XIA Changliang, SONG Zhanfeng, et al. A power resonance compensation control strategy for PWM rectifiers under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 46-53.
- [16] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
HANG Lijun, LI Bin, HUANG Long, et al. A Multi-resonant PR current controller for grid-connected inverters in renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 51-58.
- [17] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.
HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [18] LI Weiwei, RUAN Xinbo, PAN Donghua, et al. Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2237-2250.
- [19] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复 PI 控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 219-225.
ZHENG Shicheng, XU Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 219-225.

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-09-25

作者简介:

叶吉亮(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电; E-mail: jiliang_ye163@sina.com

李 岚(1962—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: 1615122370@qq.com

刘海霞(1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电。

(编辑 葛艳娜)