

基于准 PR 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制

雷亚雄, 李建文, 李永刚

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 复杂的电网工况下, 研究高效的并网逆变器控制方法具有重要的实用价值。提出了 $\alpha\beta$ 静止坐标系下基于准 PR (比例谐振) 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制策略, 与传统的 dq 坐标系下 PI (比例积分) 控制相比, 响应快速、系统稳定且能单位功率因数运行, 在电网故障情况下具有很好的鲁棒性。电容电流内环反馈控制能够抑制 LCL 滤波器在谐振频率处的谐振尖峰; 基于静止坐标系并网电流外环控制无需对电流分量进行解耦, 其控制算法简单, 准 PR 控制基波频率处增益有限, 不会造成系统不稳定, 且具有抵抗电网频率波动的能力。仿真结果证明了提出的控制策略的优越性, 并验证了其有效性。

关键词: LCL 滤波器; 双闭环控制; 准比例谐振控制

Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster

LEI Ya-xiong, LI Jian-wen, LI Yong-gang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The effective control of grid-connected inverters under complicated network situation is very important for the practical value. A dual-closed-loop control strategy based on grid-side current closed-loop and capacitor current closed-loop is proposed. Compared to conventional PI controller, it can ensure the system's speed, stability, unity power factor operation and good robustness during grid faults. Capacitor current inner-loop feedback control can suppress the LCL filter resonance peak, grid current outer-loop control based on stationary coordinate system needs no current decoupling, and the control algorithm is simple, quasi-proportional-resonant (QPR) has limited gain at the fundamental frequency, won't cause system instability, and is capable to resist the grid frequency fluctuations. The advantages of this control strategy is analyzed, and effectiveness is validated by simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277072) and Fundamental Research Funds for the Central Universities.

Key words: LCL filter; dual-closed-loop control; quasi-PR control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0044-07

0 引言

随着能源和环境问题日益严峻, 可再生能源并网发电技术越来越受到人们的重视。并网逆变器是分布式源与电网之间的接口装置, 如何有效地、可靠地将来自分布式电源的电能转换为一个复杂的动态电力系统可接受的交流电能, 研究高效的并网逆变器控制方法具有重要的现实意义^[1-3]。

LCL 型并网逆变器相对于 L、LC 型并网逆变

器对高频谐波的衰减效果显著且滤波电感相对较小, 是目前采用较多的并网滤波器^[4-5], 但 LCL 滤波器的低阻尼在谐振频率处存在谐振尖峰问题, 容易造成并网逆变器振荡甚至不稳定, 采用电容电流反馈的有源阻尼控制, 不需要其他的无源元件, 不会增加系统的功率损耗, 可以增大系统阻尼, 从而达到抑制谐振的目的, 目前对其控制效果和参数设计的研究都较为深入^[6-9]。

并网电流外环采用 PI 控制应用在单相逆变器中, 可以实现理想电网条件下高功率因数、低稳态误差及快速的响应性能^[9]。但是在电网背景谐波情况和电网电压不稳定的情况下, 其跟踪性能会变差,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277072); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

虽然可采用网压前馈控制来消除电网扰动, 但增加了控制系统的复杂性^[10]。

在三相对称系统中, dq 坐标系下 PI 控制器对并网电流进行调节时, 需要进行多次坐标变换, 且需对电流分量解耦, 计算复杂; 在三相电压不对称系统中, 注入电网的电流需包含负序分量来阻止故障影响, 若采用传统的同步旋转坐标系 PI 控制器, 只能实现对直流信号的无静差控制, 而不平衡电网电压下, 直流母线电压、有功功率、无功功率以 2 倍电网频率波动, 造成一定的偏差, 将导致并网时刻冲击, 其控制效果很不理想, 功率因数很低, 甚至不能维持系统的稳定^[11-12]。此时可以采用同步旋转坐标系下正序电流和负序电流分量的 PI 控制, 来补偿电网电压负序产生的谐波, 但计算量会再加倍^[13]。

基于 PI 调节的同步旋转坐标系的电流控制器转换到静止坐标系, 即可获得比例谐振逆变器, 两者之间是相互等效的^[14]。基于同步旋转坐标系下 PI 控制使用电网电压相角作为基准, 而谐振控制器以电网频率为基准^[15]。在三相电压不对称工况下, PI 控制需要建立正负序两个控制环来控制不对称的电流, 且两个控制环的控制相角并不相关, 但对于这两个相序分量的频率相同, 因此仅需一个比例谐振控制器即可达到同时控制正序和负序电流的效果, 且不存在交叉耦合相, 并能消除稳态误差。比例谐振控制器简单、易于数字实现, 计算量低, 在有源滤波器以及并网逆变器中得到了广泛应用^[16-17]。

理想的 PR 控制器在交流基波频率 ω_r 处增益无穷大且在其他频率处没有相移和增益, 由此可以完全消除稳态误差^[18], 应用多谐振比例谐振调节器来达到无静差跟踪正弦电流基波给定, 并减小输出电流中特定次数的谐波含量, 提高并网电流质量^[19]。但无限大增益将引起稳定性问题, 准 PR 控制器在基波频率下增益有限, 但对获得相对较小的稳态误差时还是足够的, 同时还可以用参数 ω_c 设定合适的带宽, 以提高系统抗电网频率波动的能力。

本文针对 LCL 三相并网逆变器, 将电流信号变换到静止坐标系中, 内环电容电流反馈, 外环节网侧电流准 PR 控制实现高效并网。电容电流反馈系数较小, 阻尼作用将减弱, 难以抑制谐振峰值, 而反馈系数较大, 会显著减少系统的相位裕度, 准 PR 参数中比例环节决定系统在带宽, 相位裕度, 幅值裕度方面的性能, 而谐振控制环节可以对特定频率无静差控制, 而且能很好抑制电网电压、频率的扰动。这需要电容电流的反馈系数与准 PR 参数的合理设计, 从而抑制 LCL 谐波峰值, 抵抗电网电压、频率波动的影响, 实现高功率因数并网。本文首先

介绍了电容电流反馈对 LCL 谐振峰值的抑制作用, 比较了 PR 与准 PR 调节器的性能, 并给出了准 PR 调节器双环 LCL 并网逆变器的设计参数, 仿真验证了其在电网电压跌落和频率变化时性能的优越性, 然后将准 PR 调节器双环控制应用在基于静止坐标系的三相并网逆变器中, 最后在电网电压波动时, 对同步旋转坐标系的 PI 控制和本文提出的控制策略进行了仿真, 验证了控制参数的有效性, 控制策略的优越性。

1 电容电流反馈对谐振峰值的抑制作用

下面分别给出了无电容电流反馈和有电容电流反馈的控制框图。如图 1 所示为无电容电流反馈时的控制框图, 其中 i_c 为电容电流, i_g 为并网电流, $K_{P_{PWM}}$ 为 PWM 发生器等效的比例系数。图 2 所示的是加入电容电流反馈的控制框图, 其中 K_C 为电容电流的比例系数。

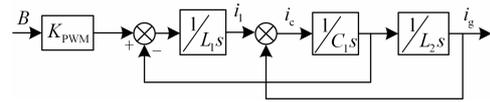


图 1 无电容电流反馈的控制框图

Fig. 1 Control diagram without i_c feedback

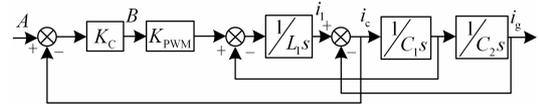


图 2 有电容电流反馈的控制框图

Fig. 2 Control diagram with i_c feedback

其各自的传递函数给出如式(1)、式(2)。

$$\frac{i_g(s)}{B(s)} = \frac{K_{P_{PWM}}}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (1)$$

$$\frac{i_g(s)}{A(s)} = \frac{K_C K_{P_{PWM}}}{L_1 L_2 C s^3 + K_C K_{P_{PWM}} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (2)$$

设 PWM 发生器等效的比例系数: $K_{P_{PWM}} = 1$, LCL 滤波器参数为 $L_1 = 6 \text{ mH}$ 、 $L_2 = 3 \text{ mH}$ 、 $C = 10 \mu\text{F}$ 。根据传递函数做出各自的零极点图 3。

根据自控原理, 加入电容电流反馈后, 虚轴上的一对极点向左平移。极点位于虚轴上系统呈现振荡性, 当极点位于左半平面时, 系统是稳定的, 振荡性减弱, 系统阻尼增加, 暂态响应呈收敛性。下面做出系统的伯德图 4 进一步进行分析。

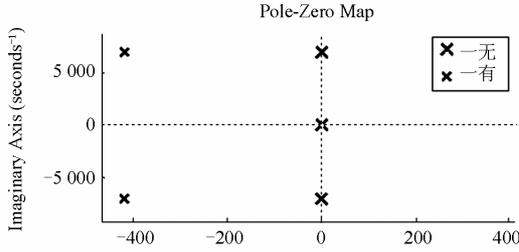


图 3 有、无电容电流反馈系统的零极点图

Fig. 3 Zero-pole figure of system with/without i_c feedback

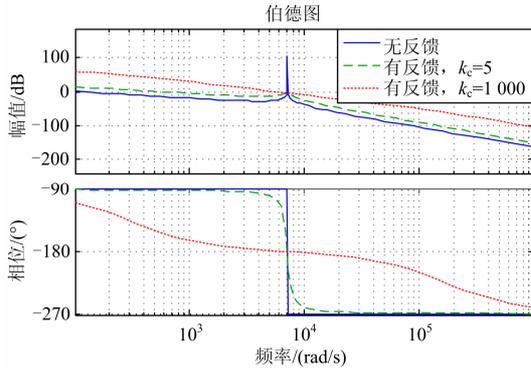


图 4 有/无电容电流反馈的伯德图

Fig. 4 Bode of structure with/without i_c feedback

从图 4 可以看出, 无电容电流反馈时, 在 LCL 谐振频率处存在谐振尖峰, 此尖峰能引起并网电流的畸变, 将使得并网电流发生谐振, 造成系统的不稳定。加入带比例环节的电容电流反馈后, 增加了系统的阻尼, 谐振峰值降低, 且随着比例系数的增大, 其谐振抑制效果更好, 但是比例系数越大, 系统的开环传递函数的系统阻尼也越大, 系统的快速性降低, 调节时间较长, 同时也会显著减小系统的相位裕度^[7]。

2 网侧电流控制策略

2.1 准 PR 与 PR 控制性能比较

网侧电流采用准 PR 控制, 这一部分通过对准 PR 与 PR 控制伯德图的分析, 对比了两者的特点, 并分析了准 PR 中参数对其性能的影响。首先给出两者的传递函数, 分析了在基波频率处的增益特点, 并绘制了各自的伯德图进行验证。

PR 与准 PR 环节的传递函数如式(3)、式(4)。

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

$$G_{QPR} = K_p + \frac{2\omega_c K_R s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_r^2} \quad (4)$$

将 $s = j\omega$ 分别代入式(3)、式(4), 求得各自在基波频率处的增益为

$$G_{PR} = K_p + \frac{2jK_R \omega}{(j\omega)^2 + \omega^2} = \infty \quad (5)$$

$$G_{QPR} = K_p + \frac{2j\omega_c K_R \omega_r}{(j\omega_r)^2 + 2j\omega_c \omega_r + \omega_r^2} = K_p + K_R \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可以看出, PR 控制在基波频率处的增益为无穷大, 而准 PR 控制的增益是可以通过参数来调节的。

PR 与准 PR 环节的各自的伯德图如图 5。

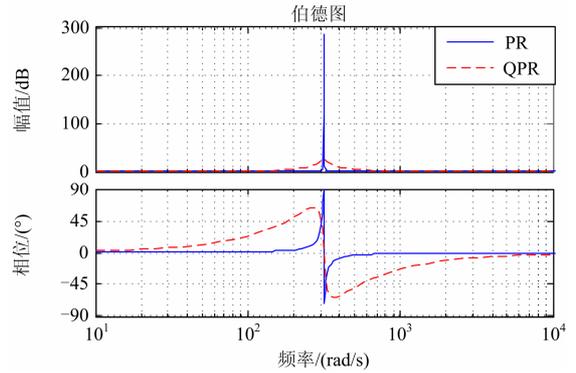


图 5 准 PR 与 PR 控制的伯德图

Fig. 5 Bode of quasi-PR and PR control

从图 5 中可以看出采用准 PR 控制避免了比例谐振控制在基波频率处增益无限大的问题, 从而避免了无限大增益引起的稳定性问题。

K_p 、 K_R 、 ω_c 分别取不同值时对系统的影响见图 6。

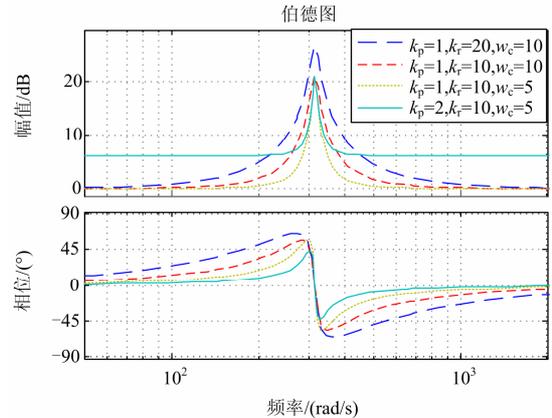


图 6 K_p 、 K_R 、 ω_c 取不同值时准 PR 控制的伯德图

Fig. 6 Bode of quasi-PR with different K_p , K_R , and ω_c

采用准 PR 控制, 参数 K_R 决定基波频率处的幅值增益, K_R 越大其增益越大; ω_c 决定系统的带宽, ω_c 越大系统的带宽越大; K_p 影响低频与高频处的幅值增益以及相位裕度, K_p 越小, 低频与高频处

的幅值增益越小, 但 K_p 很小, 系统的动态响应也会降低; 且准 PR 控制器中这三个参数相互影响作用很小。所以选择准比例谐振参数时, 需增大基频处的幅值增益, 增大 K_R 数值, 以提高基频处的稳态误差; 选择较大的 ω_c 值来设定系统的带宽, 助于降低控制器对电网电压频率变化的灵敏性; 合适的 K_p 值可以平衡系统的快速性与准确性。

2.2 电流双闭环控制框图

图 7 给出了基于 $\alpha\beta$ 坐标系的双闭环准 PR 控制策略的控制框图。

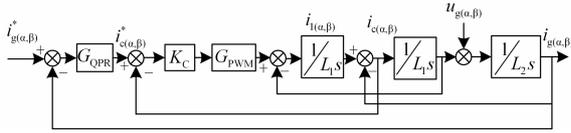


图 7 $\alpha\beta$ 坐标系下双闭环准 PR 控制框图

Fig. 7 Dual-loop control diagram of quasi-PR under $\alpha\beta$ coordinate system

该系统的开环传函数为

$$\frac{i_g(\alpha, \beta)}{i_g^*(\alpha, \beta)} = \frac{B_1 s^2 + B_2 s + B_3}{A_1 s^5 + A_2 s^4 + A_3 s^3 + A_4 s^2 + A_5 s} \quad (7)$$

$$B_1 = K_p K_C K_{PWM}; \quad B_2 = 2K_C K_{PWM} \omega_c (K_p + K_R);$$

$$B_3 = K_p K_C K_{PWM} \omega_r^2; \quad A_1 = L_1 L_2 C_1;$$

$$A_2 = 2\omega_c L_1 L_2 C_1 + L_2 C_1 K_C K_{PWM};$$

$$A_3 = L_1 L_2 C_1 \omega_r^2 + 2\omega_c L_2 C_1 K_C K_{PWM} + L_1 + L_2;$$

$$A_4 = L_2 C_1 K_C K_{PWM} \omega_r^2 + 2\omega_c (L_1 + L_2);$$

$$A_5 = (L_1 + L_2) \omega_r^2$$

采用文献[9]基于系统稳态误差、相位裕度和幅值裕度的参数设计方法, 根据相位裕度 $PM > 45^\circ$, 幅值裕度 $GM > 3$ dB 和基波幅值增益 $T_{fo} > 52$ dB (对应满载时的并网电流相角误差 δ 在 5.7° 以内, 幅值误差 EM 不超过 0.5%), 基波频率上下波动 5% 的要求, 求出电容电流反馈系数 $K_C = 5$, 准比例谐振参数 $K_p = 0.4$, $K_R = 100$, $\omega_c = 5$ 。

绘制其伯德图, 如图 8。根据系统伯德图, 可以得出, 系统相角裕度为 46.6° , 增益裕度为 10.3 dB, 在基波频率处的增益为 64.5 dB, 均满足设计要求。使用劳斯判据对系统的稳定性进行分析, 得出劳斯表第一列数值全为正值, 又因为传递函数特征方程式的系数都为正, 所以基于准 PR 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制系统是稳定的。

下面通过仿真分析来检验控制策略的性能。根据图 7 的控制框图, 做出仿真模型, 对在电网电压跌落和频率变化时的情况进行了仿真。仿真结果如图 9、图 10 所示。

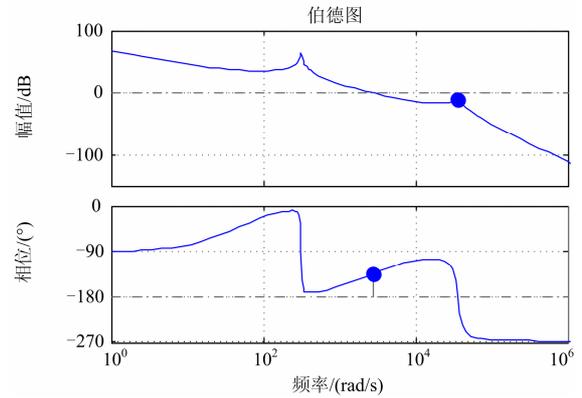


图 8 系统的伯德图

Fig. 8 Bode of whole system

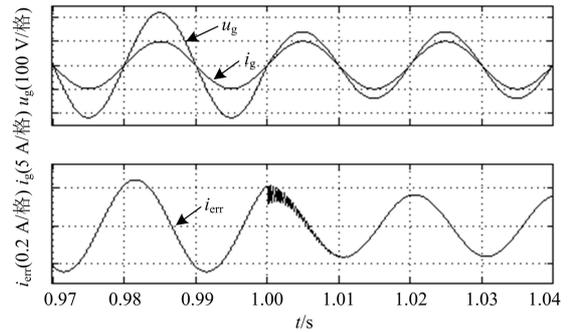


图 9 电压跌落时电压、电流及稳态误差

Fig. 9 Voltage, current and steady-state error at voltage sag

图 9 中, 在 1 s 时电压幅值由 220 V 降为 150 V, 图中分别给出了电压、电流及电流误差的波形, 可以看出在电压发生跌落时, 电流可以很快达到稳定, 仍能与电压同步, 并且电流调节的稳态误差很小 (0.2% 左右)。

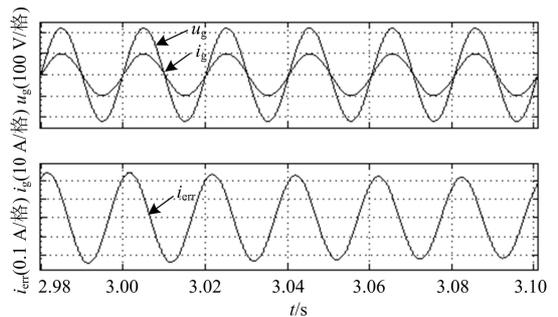


图 10 频率变化时电压、电流及稳态误差

Fig. 10 Voltage, current and steady-state error when frequency changes

图 10 中, 在 3 s 时电压频率由 50 Hz 变为 49.5 Hz, 可以看出电流同样可以很快达到稳定, 过渡过程短暂, 电流稳态误差很小 (0.2% 左右)。

3 基于准 PR 调节器电流双闭环控制在 LCL 三相并网逆变器的实现

图 11 是系统的结构图。直流电源通过电容 C_d

与逆变器的直流侧相连。逆变器的交流侧通过 LCL 滤波器与电网相连,控制算法在 $\alpha\beta$ 静止坐标系中实现,系统参数采用 2.2 节参数。电网相电压为 220 V, 电流约为 25 A。

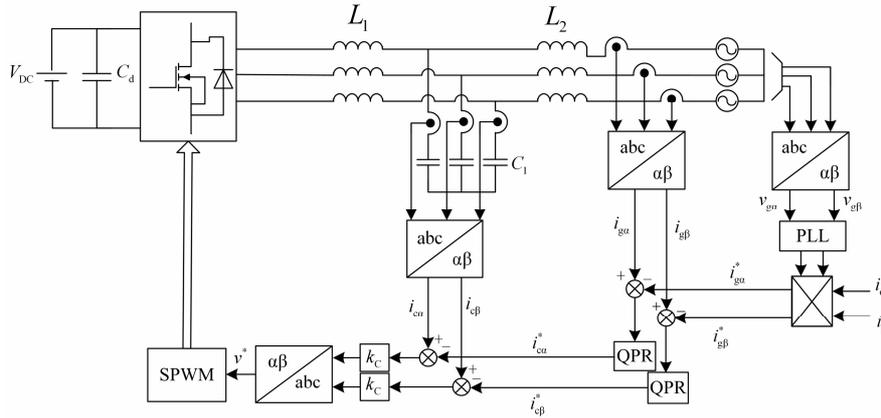


图 11 三相并网逆变器及其控制框图

Fig. 11 Three-phase grid-connected inverter and its control diagram

对图 11 的控制系统进行仿真,得到电网电压与电网电流的波形如图 12。

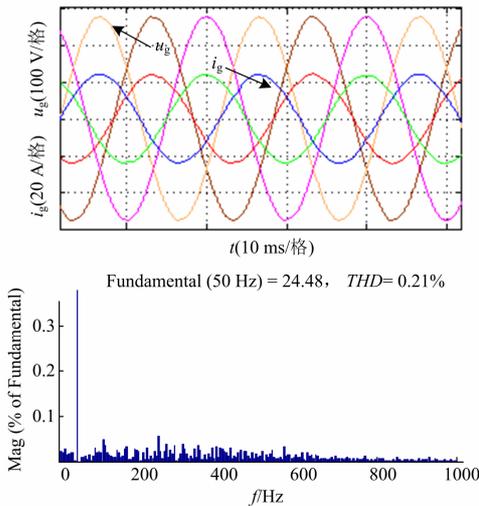


图 12 基于准 PR 控制的网侧电压、电流波形及电流 THD

Fig. 12 Waveform of grid-side voltage, current and current THD based on QPR control

图 13 是基于 dq 坐标系下 PI 控制的三相 LCL 并网逆变器的仿真波形。对比上面两组波形,准 PR 在谐波抑制方面的效果更好。其中,准 PR 的总谐波畸变率 (THD) 为 0.21%, 而 PI 的 THD 为 1.58%。

下面对电网发生相间短路故障时进行了仿真。其中 A, B 相电压幅值在 0.6 s 时跌落为原来的 0.6 倍, 0.7 s 时故障消除。图 14、图 15 分别给出了采用准 PR 控制和 PI 控制的波形。

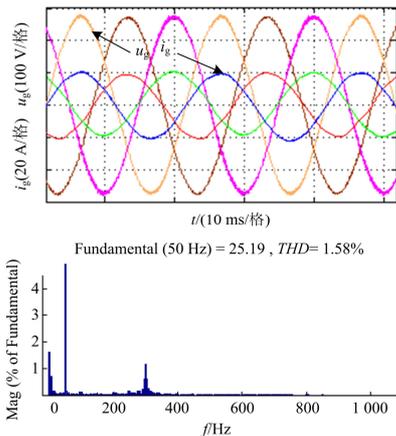


图 13 基于 PI 控制的网侧电压、电流波形及电流 THD

Fig. 13 Waveform of grid-side voltage, current and current THD based on PI control

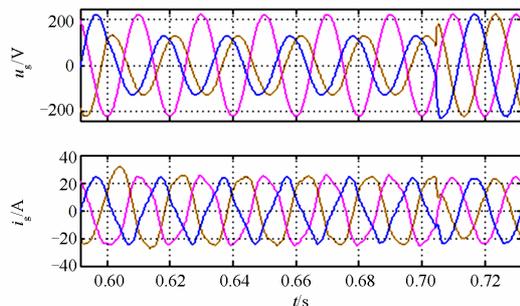


图 14 电网故障时准 PR 控制网侧电压电流波形

Fig. 14 Waveform of grid-side voltage and current based on QPR control during grid fault

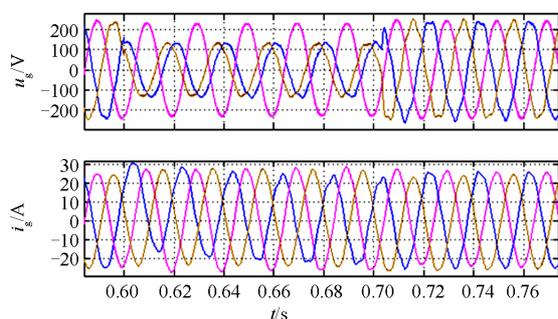


图 15 电网故障时 PI 控制网侧电压电流波形

Fig. 15 Waveform of grid-side voltage and current based on PI control during grid fault

对比图 14 和图 15 可以发现在故障期间 PR 控制仍能较好的跟踪给定电流, 受电网的影响较小, 故障消除后, 可以很快恢复稳定, 而 PI 控制在故障期间电流变化明显, 不能很好地跟踪给定电流, 并且故障消除后, 改变 PI 参数再需要 3-4 个周期才能重新稳定, 若不改变参数并网系统将不能达到稳定, 由此可以看出准 PR 控制在响应速度、稳定性等方面要优于 PI 控制。

4 结论

本文详细分析了基于准 PR 调节器双环 LCL 三相并网逆变器闭环控制技术, 并进行了仿真验证, 可以得出下面的结论:

1) 加入电容电流反馈, 可以增大系统阻尼, 使 LCL 滤波器的谐振峰值降低, 且随着电容环比例系数的增大, 其谐振抑制效果更好。

2) 准 PR 控制相对于 PR 控制, 有更大的带宽, 有助于降低控制器对电网电压频率变化的灵敏性; 在基波频率处的增益要小, 增强了系统的稳定性。

3) 本文提出的基于准 PR 调节器双闭环 LCL 三相并网逆变器控制可以保证系统的稳定, 使系统以高功率因数向电网输电, 并且在电网发生不对称故障时, 仍能跟踪电网电压, 故障消失后可以很快地恢复稳定。

参考文献

[1] NIGIM K A, ZOBAA A F. Development and opportunities of distributed generation fuelled by renewable energy sources[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2006, 26(3): 215-231.

[2] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Trans on

Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.

[3] 张东江, 仇志凌, 陈天锦, 等. 一种基于相位滞后的并网变流器电流双环控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 128-134.

ZHANG Dong-jiang, QIU Zhi-ling, CHEN Tian-jin, et al. A double loop current control approach based on phase lag for grid connected converter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 128-134.

[4] 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 Xiao-ming, DUAN Shan-xu. 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.

[5] 胡文翠, 王明渝, 钱坤. LCL 型并网逆变器电流控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 123-128.

HU Cui-wen, WANG Ming-yu, QIAN Kun. Design of current controller for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 123-128.

[6] 孙绍华, 李春鹏, 贲洪奇. 采用 LCL 滤波的三相并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 103-112.

SUN Shao-hua, LI Chun-peng, BEN Hong-qi. Design of three-phase grid-connected inverter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 103-112.

[7] 许津铭, 谢少军, 肖华锋. LCL 滤波器有源阻尼控制机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 27-33.

XU Jin-ming, XIE Shao-jun, XIAO Hua-feng. Research on control mechanism of active damping for LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 27-33.

[8] 黄挚雄, 徐保友, 沈玲菲, 等. LCL 并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 1-5.

HUANG Zhi-xiong, XU Bao-you, SHEN Ling-fei, et al. New current double closed loop control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 1-5.

[9] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计

- [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142.
- BAO Chen-lei, RUAN Xin-bo, WANG Xue-hua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142.
- [10] 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 Xue-hua, RUAN Xin-bo, LIU Shang-wei. 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.
- [11] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [12] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 48-56.
- HU Jia-bing, HE Yi-kang, WANG Hong-sheng, et al. Proportional-resonant current control scheme for rotor-side converter of doubly-fed induction generators under unbalanced network voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 48-56.
- [13] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. 光伏与风力发电系统并网变换器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [14] TEODORESCU R, BLAABJERG F, BORUP U, et al. A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004, 1: 580-586.
- [15] PETERSSON A, HARNEFORS L, THIRINGER T. Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(1): 227-235.
- [16] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. Electric Power Applications, IEEE Proceedings, 2006, 153(5): 750-762.
- [17] LASCU C, ASIMINOAEI L, BOLDEA I, et al. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(5): 1826-1835.
- [18] 马琳, 金新民, 唐芬, 等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 56-63.
- MA Lin, JIN Xin-min, TANG Fen, et al. Analysis of three-phase grid-connected inverter proportional-resonant control and grid voltagefeed-forward[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 56-63.
- [19] 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 Li-jun, 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.

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-10-16

作者简介:

雷亚雄(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网发电技术; E-mail:yaxiong_lei@hotmail.com

李建文(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源并网技术的研究;

李永刚(1967-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统的稳定性, 发电机故障诊断。