

DOI: 10.7667/PSPC151638

LCL 并网逆变器的电流双闭环控制

刘文军¹, 周龙², 陈剑¹, 唐西胜², 宋毅³, 何禹清¹

(1. 国网湖南省电力公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
3. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 采用 LCL 滤波器作为电压型并网逆变器与电网的接口, 建立 LCL 滤波器的数学模型, 提出一种基于电网侧电流外环、逆变器侧电流内环的 LCL 并网逆变器控制方法。该控制方法既能有效保护功率开关, 又能保证系统稳定及并网电流的单位功率因数。针对该电流双闭环控制方法, 给出一种基于赫尔维茨稳定判据及李纳德-威帕特稳定判据的内外环控制器参数设计方案。进行了 LCL 并网逆变器并网运行仿真与实验。仿真和实验结果验证了所提 LCL 并网逆变器控制方法的正确性和可行性。

关键词: 并网控制; 并网逆变器; 双闭环控制; LCL 滤波器; 功率因数

Control method for grid-connected inverter with LCL filter by employing dual current closed-loops

LIU Wenjun¹, ZHOU Long², CHEN Jian¹, TANG Xisheng², SONG Yi³, HE Yuqing¹

(1. Hunan Electric Power Corporation Economical & Technical Research Institute, Changsha 410004, China;
2. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: A LCL filter is adopted as an interface between grid-connected inverter and power grid. The mathematical model of the LCL filter is built, and then a control method for grid-connected inverter with a LCL filter is proposed. This control method employs an external grid-side current loop and an internal inverter-side current loop. And this control method can not only protect power switches effectively, but also ensure the system stability and high in-grid power factor. Based on the Hurwitz stability criterion and Lienard Chipart stability criterion, the design method of controller parameters in inner and outer loops is derived. Simulations and experiments of grid-connected inverter in grid-connected mode are conducted. Simulation and experimental results validate the correctness and feasibility of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207156).

Key words: grid-connected control; grid-connected inverter; dual closed-loop control; LCL filter; power factor

0 引言

随着人们对能源问题与环境问题的日益重视, 风力发电、光伏发电等可再生能源得到了广泛应用。并网逆变器作为可再生能源发电系统与电网连接的核心接口装置, 直接影响到整个发电系统的并网性能, 近年来已得到了国内外研究学者的广泛关注^[1-4]。

为抑制可再生能源发电系统注入电网电流的谐波, 传统并网逆变器在接入电网之前串入 L 滤波器。与 L 滤波器相比, LCL 滤波器由于可用较小的

总电感量实现较理想的谐波抑制效果, 成本优势明显, 已在电压型并网逆变器中成为首选^[5-8]。但 LCL 滤波器是一个三阶系统, 对系统的控制策略提出了更高的要求。文献[9-10]指出如果直接采用典型的电网侧电流直接闭环的控制策略, 系统不稳定, 且不利于功率开关的保护。文献[11-12]采用逆变器侧电流闭环的控制策略, 该策略易于系统稳定, 且可以更有效地保护功率开关, 但属于间接并网电流控制, 电容支路的分流作用会降低并网电流功率因数。文献[8, 13]提出采用电网侧电流和电容电流双闭环控制策略, 用电容电流内环来增加系统阻尼, 从而可抑制系统振荡, 但该方法在功率开关的保护上有待

完善。文献[14]提出一种基于逆变器侧电流闭环和电容电流前馈的并网逆变器控制策略, 所增加的电容电流前馈环节在一定程度上提高了并网电流功率因数, 但该策略仍属于间接并网电流控制。

本文提出了一种基于电网侧电流外环、逆变器侧电流内环的 LCL 并网逆变器电流双闭环控制方法。该控制方法既能有效保护功率开关, 又能保证系统稳定及并网电流的单位功率因数。首先建立了 LCL 滤波器的数学模型, 然后给出了 LCL 并网逆变器的控制方法, 接着给出了内外环控制器的参数设计方案, 最后对所提控制方法进行了仿真与实验验证。

1 主电路拓扑与 LCL 滤波器数学模型

图 1 为带 LCL 滤波器的三相电压型并网逆变器的主电路拓扑, 由直流电源 U_{dc} 、直流母线电容 C_{dc} 、并网逆变器、LCL 滤波器等组成。LCL 滤波器由电网侧电感 L_g 、逆变器侧电感 L_{conv} 、滤波电容 C 组成。

由图 1 可知

$$L_{conv} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{conva} \\ i_{convb} \\ i_{convc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{conva} \\ u_{convb} \\ u_{convc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{conva} \\ i_{convb} \\ i_{convc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_{convk} 、 i_{gk} 、 i_{ck} ($k=a,b,c$)分别为逆变器侧电流、电网侧电流、电容电流; u_{convk} 、 u_{ck} 、 u_k ($k=a,b,c$)分别为逆变器侧电压、电容电压、电网电压。

将式(1)、式(2)、式(3)分别变换到 dq 坐标系下, 可得

$$L_{conv} \frac{d i_{convd}}{dt} - \omega L_{conv} i_{convq} = u_{convd} - u_{cd} \quad (4)$$

$$L_g \frac{d i_{gd}}{dt} - \omega L_g i_{gq} = u_{cd} - u_d \quad (5)$$

$$C \frac{d u_{cd}}{dt} - \omega C u_{cq} = i_{cd} = i_{convd} - i_{gd} \quad (6)$$

式中: i_{convm} 、 i_{gm} 、 i_{cm} ($m=d,q$)分别为逆变器侧电流、电网侧电流、电容电流的 dq 分量; u_{convm} 、 u_{cm} 、 u_m ($m=d,q$)分别为逆变器侧电压、电容电压、电网电压的 dq 分量; ω 为电网电压角频率。

2 LCL 并网逆变器控制方法

基于电流双闭环的 LCL 并网逆变器的控制方法如图 1 所示。由图 1 可知, LCL 并网逆变器采用电网侧电流外环、逆变器侧电流内环的双闭环控制策略。

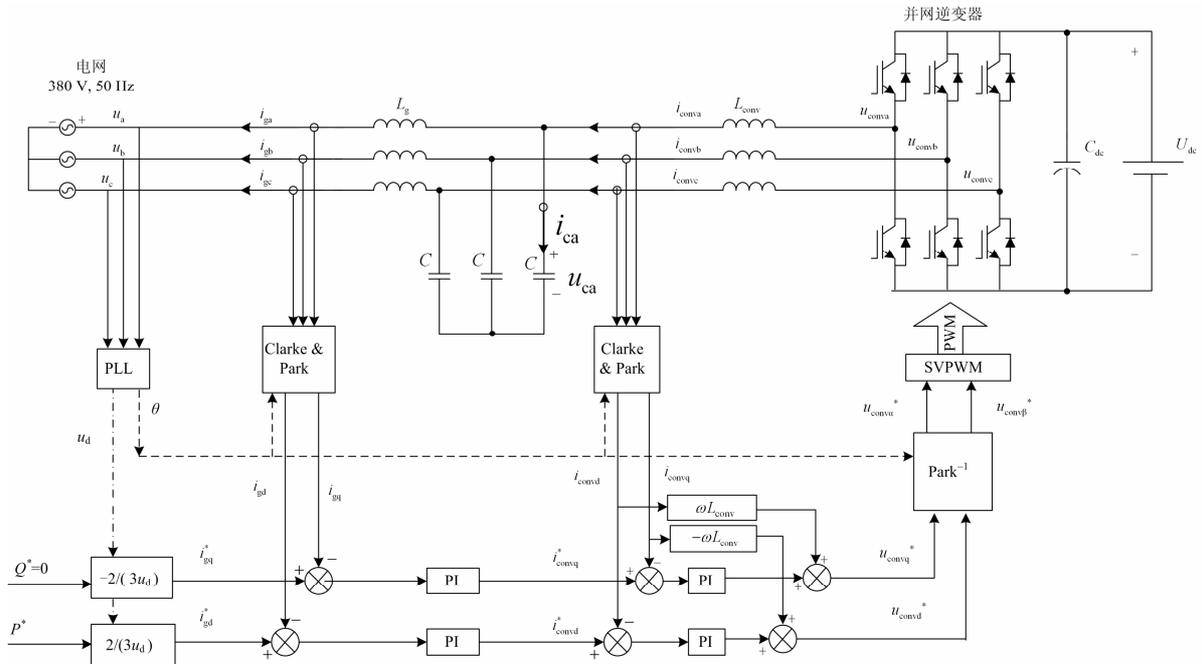


图 1 LCL 并网逆变器控制方法

Fig. 1 Control method for grid-connected inverter with LCL filter

具体工作过程：首先通过电网电压锁相环获得与 d 轴同相位的电网电压矢量的相角 θ 及电网电压 d 轴分量 u_d 。然后利用 θ 将三相静止坐标系下的电网侧电流 i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 和逆变器侧电流 i_{conva} 、 i_{convb} 、 i_{convc} 分别变换到两相旋转坐标系下的直流电流分量 i_{gd} 、 i_{gq} 和 i_{convd} 、 i_{convq} 。接着通过公式 $i_{gd}^* = 2P^*/(3u_d)$ 与公式 $i_{gq}^* = -2Q^*/(3u_d)$ 由并网有功、无功功率指令值 P^* 、 Q^* 计算出 i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 作为电网侧外环的给定信号，并令无功功率指令值 Q^* 为零，使得系统以单位功率因数运行。再将电网侧外环的输出信号 i_{gd}^* 作为逆变器内环的给定信号。逆变器内环的输出信号与逆变器侧电流前馈解耦项 $-\omega L_{conv}i_{convq}$ 、 $\omega L_{conv}i_{convd}$

相加后分别输出 u_{convd}^* 、 u_{convq}^* ，并利用 θ 将 u_{convd}^* 、 u_{convq}^* 从两相同步旋转坐标系变换到两相静止坐标系下的调制信号 $u_{conv\alpha}^*$ 、 $u_{conv\beta}^*$ 。最后，将 $u_{conv\alpha}^*$ 、 $u_{conv\beta}^*$ 送给 SVPWM 调制器生成 PWM 脉宽调制驱动信号。

3 控制器参数设计与稳定性分析

3.1 稳定条件分析及参数设计

采用图 1 所示的 $i_{gq}^* = 0$ 及逆变器侧电流前馈解耦控制策略，并忽略 ωCu_{cq} 时，根据式(4)、式(5)、式(6)可推出逆变器侧 d 轴电流控制器的结构图如图 2 所示，电网侧 d 轴电流控制器的结构图如图 3 所示。

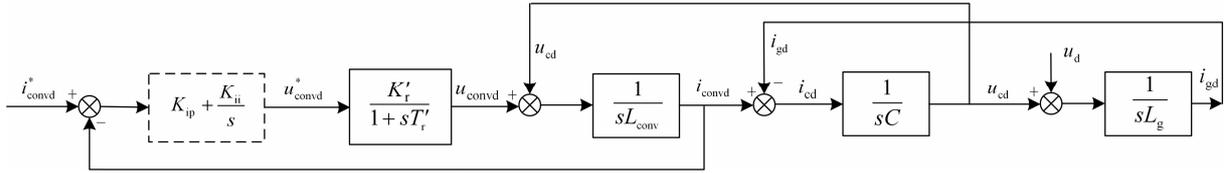


图 2 逆变器侧 d 轴电流环结构图

Fig. 2 Block diagram of inverter side current loop in d -axis

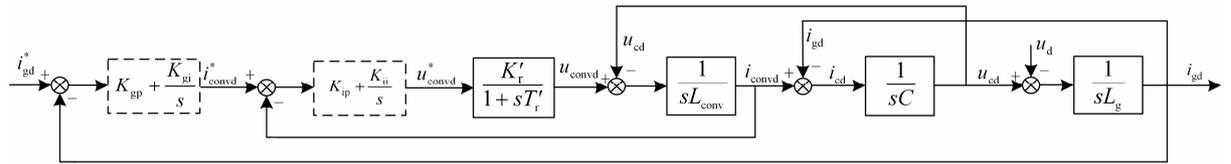


图 3 电网侧 d 轴电流环结构图

Fig. 3 Block diagram of grid side current loop in d -axis

图 3 中 $K_r'(1+sT_r')$ 为逆变器的传递函数，由于 T_r' 很小，这里采用近似关系式 $(1+sT_r') \approx 1$ 。根据图 3 可得电网侧 d 轴电流环的开环传递函数为

$$G_{g,ol} = \frac{N_g(s)}{D_g(s) - N_g(s)} \quad (7)$$

电网侧 d 轴电流环的闭环传递函数为

$$\frac{i_{gd}(s)}{i_{gd}^*(s)} = \frac{N_g(s)}{D_g(s)} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中

$$N_g(s) = K_r'K_{ip}K_{gp}s^2 + (K_r'K_{ii}K_{gp} + K_r'K_{ip}K_{gi})s + K_r'K_{ii}K_{gi}$$

$$D_g(s) = a_0s^5 + a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5$$

其中

$$\begin{aligned} a_0 &= CL_{conv}L_g; a_1 = CL_gK_r'K_{ip}; a_2 = L_{conv} + L_g + CL_gK_r'K_{ii}; \\ a_3 &= K_r'K_{ip} + K_r'K_{ip}K_{gp}; a_4 = K_r'K_{ii} + K_r'K_{ip}K_{gi} + K_r'K_{ii}K_{gp}; \\ a_5 &= K_r'K_{ii}K_{gi} \end{aligned}$$

由式(8)可知，电网侧电流外环的特征方程为 $D_g(s) = 0$ 。根据赫尔维茨稳定判据及李纳德-威帕特稳定判据可得，电网侧电流外环稳定的充分必要条件为 $D_g(s)$ 的各项系数为正，且

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0 \quad (9)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} > 0 \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可解出电网侧电流外环控制器参数 K_{gp} 、 K_{gi} 的边界值。

在进行控制器参数设计时, 逆变器侧电流内环控制器的参数 K_{ip}, K_{ii} 的设计可结合文献[9]分别按式(11)、式(12)进行初步设计, 然后可在仿真及实验中进一步调整。

$$K_{ip} = \frac{2\zeta L_{conv}}{K_r'} \sqrt{\frac{L_{conv} + L_g}{CL_{conv}L_g}} \quad (11)$$

$$K_{ii} = \frac{K_{ip}}{6T_r'} \quad (12)$$

其中, ζ 一般取为 0.707。

确定逆变器侧电流内环控制器的参数后, 再进行电网侧电流外环控制器的参数设计。这里可采用“振荡指标法”^[13]并结合式(9)、式(10)所确定的 K_{gp} 、 K_{gi} 的边界条件获得一组参数, 然后利用仿真软件对这组参数进行一定程度的优化微调, 以确保系统具备足够的稳定裕度, 同时尽可能兼顾系统的动态性能。

3.2 设计实例

LCL 滤波器及逆变器参数如表 1 所示。

表 1 LCL 滤波器及逆变器参数

Table 1 Parameters of LCL filter and inverter

参数	数值	参数	数值
L_g	0.3 mH	L_{conv}	0.8 mH
C	60 μ F	K_r'	0.064 6
SVPWM 开关频率	6 kHz	T_r'	0.000 083 s

将表 1 中的数据代入式(11)、式(12)可得 $K_{ip}=153$, $K_{ii}=307\ 230$, 即得到逆变器侧电流内环控制器参数。将 $K_{ip}=153$, $K_{ii}=307\ 230$ 及表 1 中的数据带入式(9)、式(10)可分别得到式(13)、式(14) (详细推导过程因篇幅限制从略)。

$$1 - 1.217K_{gp} > 0 \quad (13)$$

$$\begin{cases} -K_{gp}^3 - 1.625K_{gp}^2 - 0.25K_{gp} + 0.375 > 0 \\ -K_{gi}^2 - 1087.6K_{gi} + 4828000 > 0 \end{cases} \quad (14)$$

综合式(13)、式(14)可得

$$\begin{cases} 0 < K_{gp} < 0.375 \\ 0 < K_{gi} < 1720 \end{cases} \quad (15)$$

且当 $K_{gp}=0.3$ 时, 由式(10)进一步可得

$$-K_{gi}^2 - 2877K_{gi} + 1631900 > 0 \quad (16)$$

由式(16)可知, 当 K_{gp} 取为 0.3 时, $0 < K_{gi} < 485$ 。

当 $K_{gp}=0.2$ 时, 由式(10)进一步可得

$$-K_{gi}^2 - 2152K_{gi} + 3244400 > 0 \quad (17)$$

由式(17)可知, 当 K_{gp} 取为 0.2 时, $0 < K_{gi} < 1022$ 。

图 4 为电网侧电流外环在不同控制参数下的开环伯德图。可见, 各组参数均能较好地抑制系统谐振现象。综合考虑系统的带宽、稳定裕度、稳态精度及动态性能, 选择第 4 组参数 $K_{gp}=0.2$, $K_{gi}=300$ 作为电网侧电流外环控制器的初始参数, 然后在仿真或实验中可在此参数基础上做进一步的微调。

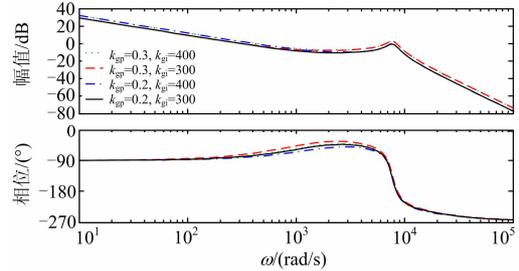


图 4 电网侧电流外环开环伯德图

Fig. 4 Bode diagram of outer grid side current open-loop

4 仿真与实验

4.1 仿真

为验证所提并网逆变器控制方法的正确性, 利用 Matlab/Simulink 进行了仿真研究。电网线电压有效值为 380 V, 电网频率为 50 Hz, 直流电源电压 U_{dc} 为 700 V, LCL 滤波器参数与表 1 相同。

控制器参数如表 2 所示。

表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters

逆变器侧电流内环	电网侧电流外环
$K_{ip}=153$	$K_{gp}=0.2$
$K_{ii}=307\ 230$	$K_{gi}=300$

当并网有功功率指令值 P^* 为 18.7 kW 时, $i_{gd}^*=2P^*/(3u_d)=2 \times 18700/3/311=40$ A, 电网 a 相电压 u_a (为了便于比较, 电网电压作 1/8 处理)、电网侧 a 相电流 i_{ga} 、逆变器侧 a 相电流 i_{conva} 仿真波形如图 5 所示。

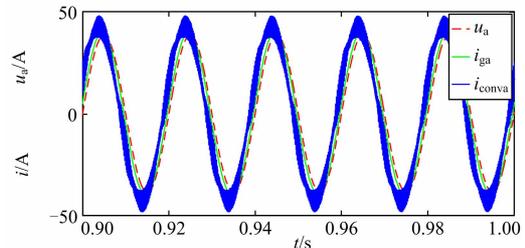


图 5 电网电压、电网侧电流和逆变器侧电流

Fig. 5 Grid voltage, grid-side and inverter-side currents

从图 5 可以看出, 并网电流 i_{ga} 与电网电压 u_a 同相位, 并网逆变器以单位功率因数运行。

电网侧电流的 dq 轴分量如图 6 所示。

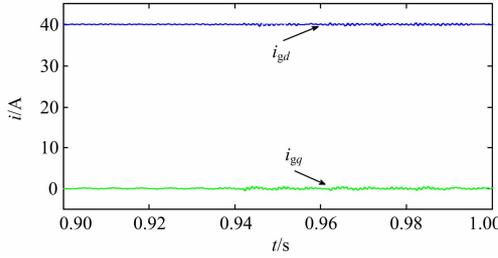


图 6 电网侧电流 dq 轴分量

Fig. 6 Grid-side d -axis and q -axis currents

从图 6 可以看出，并网电流的 q 轴分量在 0 附近，保证了并网电流 dq 分量的合成矢量与电网电压矢量同向，进而保证了并网逆变器以单位功率因数运行。

4.2 实验

为进一步验证所提逆变器并网控制方法的正确性，搭建了 LCL 并网逆变器实验平台，完成了并网运行实验研究。实验参数与仿真参数相同。

当 P^* 为 18.7 kW，即 i_{gd}^* 为 40 A 时，电网 a 相电压 u_a 、电网侧 a 相电流 i_{ga} 、直流母线电压 U_{dc} 的稳态运行波形如图 7 所示。

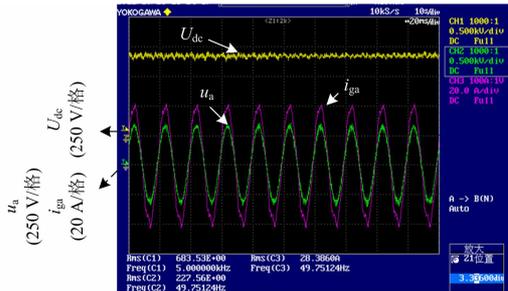


图 7 并网稳态实验波形

Fig. 7 Grid-connected experimental waveforms in steady mode

从图 7 可以看出，在稳态过程中系统运行稳定，并网电流 i_{ga} 与电网电压 u_a 同相位，并网逆变器以单位功率因数向电网输送能量。

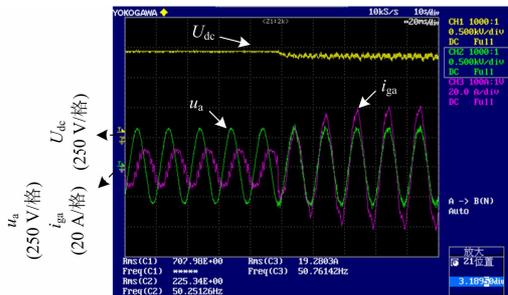


图 8 并网暂态实验波形

Fig. 8 Grid-connected experimental waveforms in transient mode

当 i_{gd}^* 为 40 A 时，并网逆变器突然起动的过程中，电网 a 相电压 u_a 、电网侧 a 相电流 i_{ga} 、直流母线电压 U_{dc} 的暂态运行波形如图 8 所示。

从图 8 可以看出，系统在半周期内即可进入稳定运行状态，说明系统具有较快的动态响应能力。此外还可以看出，在起动前，虽然并网逆变器相当于开路，但由于 LCL 滤波器中滤波电容 C 的存在，并网电流 i_{ga} 电流并不为零。

5 结论

本文提出了一种基于电网侧电流外环、逆变器侧电流内环的 LCL 并网逆变器电流双闭环控制方法。该控制方法既能有效保护功率开关，又能保证系统稳定并网电流的单位功率因数。给出了内外环控制器的参数设计方案。进行了 LCL 并网逆变器并网运行仿真与实验。仿真和实验结果验证了所提 LCL 并网逆变器控制方法的正确性和可行性。

参考文献

- [1] CHAKRABORTY S, KRAMER B, KROPOSKI B. A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2323-2335.
- [2] 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, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [3] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICZ J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [4] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [5] 郭伟峰, 徐殿国, 武健, 等. LCL 有源电力滤波器新型控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 42-48.
GUO Weifeng, XU Dianguo, WU Jian, et al. Novel control method for LCL active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 42-48.

- [6] 朱时雨, 郑涛, 罗美玲, 等. 基于滤波装置短路的孤岛检测法在分布式发电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 106-111.
ZHU Shiyu, ZHENG Tao, LUO Meiling, et al. Islanding detection method based on short-filtering device for DG system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 106-111.
- [7] 沈国桥, 徐德鸿. LCL 滤波并网逆变器的分裂电容法电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 36-41.
SHEN Guoqiao, XU Dehong. Current control for grid-connected inverters by splitting the capacitor of LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 36-41.
- [8] 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.
- [9] YI T, POH CHIANG L, PENG W, et al. Exploring inherent damping characteristic of LCL-filters for three-phase grid-connected voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1433-1443.
- [10] 仇志凌, 杨恩星, 孔洁, 等. 基于 LCL 滤波器的并联有源电力滤波器电流闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 15-20.
QIU Zhiling, YANG Enxing, KONG Jie, et al. Current loop control approach for LCL-based shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 15-20.
- [11] BOLSENS B, DE BRABANDERE K, VAN DEN KEYBUS J, et al. Model-based generation of low distortion currents in grid-coupled PWM-inverters using an LCL output filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1032-1040.
- [12] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [13] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
XU Zhiying, XU Aiguo, XIE Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41.
- [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.

收稿日期: 2015-09-14; 修回日期: 2016-01-21

作者简介:

刘文军(1986-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为微型电网、电网规划; E-mail: wenjunliu1346@163.com

(编辑 张爱琴)