

集中补偿型 LCL-APF 的有源阻尼控制方法研究

李建泉¹, 吴小云¹, 何星瑶², 李志勇²

(1. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对电网中采用无源网络进行滤波后仍然存在的谐波及无功问题, 采用LCL-APF系统在变配电所侧对电网中的谐波及无功分量进行集中补偿。该 LCL-APF 系统采用直接功率控制的策略, 省去了复杂的谐波检测及计算环节, 改善了网侧电流的失真情况, 将电网电流的谐波畸变率从 26.86% 降到了 3.78%。通过机理建模及波特图分析, 在功率控制环内加入有源阻尼环节, 有效抑制了三相 LCL 系统引起的谐振问题, 提升了 LCL-APF 系统的动态性能。仿真结果证明了该控制方法的正确性与可行性。

关键词: 集中补偿; 三相 LCL; APF; 直接功率控制; 有源阻尼

Research on the active power damping control of LCL-APF based on concentrated compensation

LI Jianquan¹, WU Xiaoyun¹, HE Xingyao², LI Zhiyong²

(1. CSR Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 2. Information Science and Engineering School, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: For reducing the harmonic and reactive power of the grid after being filtered with reactive network, a LCL-APF system is applied to decrease the remain harmonic and reactive power of the grid for concentrated compensation in the transformer substation. The direct power control method is adopted which omits the detection and calculation of harmonic and reactive current and improves the distortion of grid current which is decreased to 3.78% from 26.86%. Moreover, through the analysis of the mathematical model and bode figure, the active damping method is applied in the power control loop for suppressing the resonance of three-phase LCL, which promotes the dynamic performance of LCL-APF. Simulation results show that the proposed method is correct and feasible.

Key words: concentrated compensation; three-phase LCL; APF; direct power control; active damping

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0101-06

0 引言

针对厂矿及社区中由于负载数量众多, 种类复杂且分布较分散而引起的电能质量问题, 就地补偿的策略不再适宜, 而常见的在变电所进行集中补偿的方法能有效改善电网中的谐波及无功含量, 其中, 电容器等无源网络能补偿电网中大部分无功分量。而为了达到更好的补偿效果、获得更高品质的电网电流, 采用有源滤波器(APF)来完成谐波及剩余一定量的无功的补偿。而为了实现更好的谐波补偿效果和大功率场合中的有效应用, APF 需要更高的补偿带宽和更低的开关纹波含量。为此引入了 LCL 滤波器, LCL 滤波器的阻抗值与其流过电流的频率大小成反比, 因此可以有效滤除电流中的高频谐波, 且其在较低的开关频率下仍具有优异的性能, 在大功率应用场合优势更为明显, 因此两者的结合 LCL-APF

成为了目前集中补偿方式中的重要趋势^[1-2]。

APF 的控制方式主要分为常规控制与直接功率控制两种。相较于以往传统的电流控制方式, 直接功率控制无需另增额外传感器, 结构较为简单, 响应速度快, 比较适用于集中型 APF 系统^[3-4]。文献[5-6]依据瞬时功率理论, 采用直接功率控制方式, 改善了系统的动态性能; 文献[7]将换流器直流侧电压控制输出作为 APF 的有功功率输入参考值, 并对开关查表法进行了改进。但以上研究都是对 L 型 APF 进行研究, 并没有考虑配电所侧的集中补偿方式中的相关应用, 且其并没有考虑高阶 LCL 滤波器存在时可能引起的谐振问题。

抑制 LCL 滤波器谐振的方法主要有无源阻尼法和有源阻尼法两种, 它们都是通过增加系统阻尼的方法来抑制系统谐振。但无源阻尼法会影响系统滤波性能并增加系统损耗, 且其在大功率场合发热严

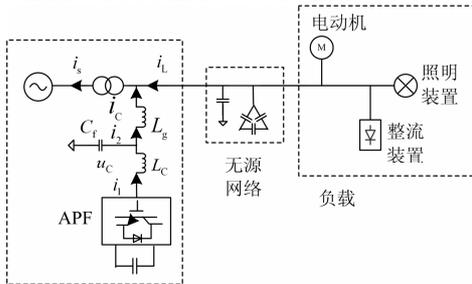
重；而有源阻尼法则是通过改变控制算法来抑制系统谐振，无需改变滤波器硬件结构，也不会增加额外的系统损耗，因此引起了人们的关注^[8]。文献^[9]提出了反馈电容电流来实现系统稳定控制的虚拟阻尼方法，文献^[10]提出了反馈电容电压的控制策略，但以上文献均是在标准 50 Hz 正弦波的条件下进行运用，其并没有在存在大量谐波及无功分量的电力系统中进行研究。

本文首先介绍了集中补偿型 LCL-APF 系统的应用拓扑结构，然后分析在此系统中应用的直接功率控制策略，该方法无需检测谐波电流含量，而是通过直接检测网侧电压及电流，并通过直流侧电压控制的输出获得 APF 的补偿参考值，实现了 APF 的快速功率调节和谐波补偿；进一步分析了该系统中存在的高频谐振问题，通过在功率控制环中加入有源阻尼环节有效地解决了该问题，保证系统的稳定运行。

1 集中补偿型 LCL-APF 系统

1.1 系统应用拓扑

并联型 LCL-APF 系统并联在电网与负载之间，由电压源型逆变器和 LCL 滤波器组成，系统结构如图 1。其中： L_c 、 L_g 和 C_f 分别为逆变器侧电感、网侧电感和滤波电容； u_s 为电网相电压； u_L 为负载输出电压； u_{inv} 为 APF 输出电压； i_s 、 i_L 和 i_c 分别为电网电流、负载电流和补偿电流^[11-12]。



变配电所

图 1 LCL-APF 系统应用拓扑

Fig. 1 Applied topology of LCL-APF

假设系统三相对称，滤波电感工作在线性状态，IGBT 为理想开关元件，忽略磁滞饱和现象的条件下，根据基尔霍夫电压电流定律可得到系统电路方程为

$$\begin{cases} L_c \frac{di_1}{dt} = u_{inv} - u_c \\ L_g \frac{di_2}{dt} = u_c - u_s \\ C_f \frac{du_c}{dt} = i_1 - i_2 \end{cases} \quad (1)$$

APF 工作在受控电压源模式，将 i_L 当作干扰， u_{inv} 、 u_s 和 i_c 分别当作输入和输出。由式(1)可得 LCL-APF 的三阶状态空间方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_c} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_g} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$y = (0 \quad 1 \quad 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.2 直接功率控制策略

图 2 中所示的 LCL-APF 系统采用直接功率控制方法，控制系统由直流侧电压控制环及功率控制环组成。通过直接检测网侧电流电压 i_s 与 u_s 获得电源有功功率 p_s 及无功功率 q_s ，再通过直流侧电压 U_{dc} 的控制得到电源的有功参考值 p_s^* 及无功参考值 q_s^* ，再通过 PI+SVM 环节产生开关频率恒定的脉冲波，从而达到对 APF 的有效控制^[13-14]。

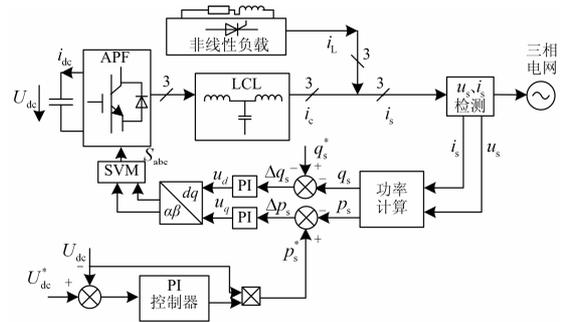


图 2 LCL-APF 直接功率控制

Fig. 2 Control diagram of LCL-APF with direct power control

1.2.1 直流侧电压环

APF 直流侧参考电压的获得则是通过下垂控制器完成，考虑电源电压升高和非线性负载增多同时出现的情况，取一定的裕量，综合可得直流侧下垂控制器如下，其中 u_{sm} 为网侧电压最大值。

$$\Delta U_d = 1.1 \left(\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} - U_{sm} \right) \quad (3)$$

$$U_{ref}^* = \sqrt{3}(\Delta U_d + U_{sm}) \quad (4)$$

APF 直流侧下垂控制器控制策略如图 3 所示，对电网电压 u_{sabc} 及电流 i_{sabc} 经过 abc/dq 坐标变换，再将获得的 dq 坐标系下的 u_{sd} 及 i_{sd} 经过下垂控制器

获得参考电压 u_{dc}^* , 将 u_{dc} 与 u_{dc}^* 的差值通过 PI 调节器, 其输出与 u_{dc} 相乘即可得电源有功功率的参考值 p_s^* 。

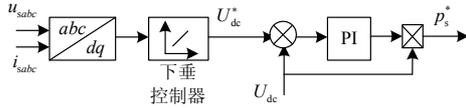


图 3 APF 直流侧下垂控制器控制策略

Fig. 3 Block diagram of DC link voltage control by the drop regulator

1.2.2 功率控制环

基于瞬时无功功率理论, 在 dq 坐标系下, 电源瞬时有功和无功定义为

$$\begin{cases} p_s = u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq} \\ q_s = u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

由直流侧电压环可得出电源有功功率参考值 p_s^* , 而电源无功功率参考值 q_s^* 为零, 将 p_s^* 、 q_s^* 分别与 p_s 、 q_s 进行比较得出 APF 应输出的补偿谐波量 Δp 与补偿无功量 Δq , 其经过 PI 控制器获得 dq 坐标系下电压的矢量参考值 u_d 与 u_q , 对 u_d 、 u_q 进行 $dq/\alpha\beta$ 变换, 再将得到的 u_α 与 u_β 经过 SVM 模块得到控制 APF 中各 IGBT 的开关时序信号即所需的 PWM 波, 从而实现了无需检测谐波电流的 APF 恒频直接功率控制^[15-16]。

假设反馈电流延时与指令电流延时相等, 功率内环控制框图如图 4 所示。

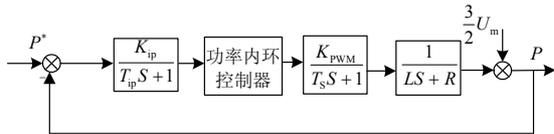


图 4 功率环控制框图

Fig. 4 Control diagram of power loop

其中: $K_{pwm}/T_s s + 1$ 表示 PWM 环节; K_{pwm} 表示 PWM 环节的增益; T_s 为采样周期; K_{ip} 为功率反馈环节的放大系数; T_{ip} 为反馈功率和指令功率的时间常数; P^* 为功率参考值; P 为功率输出值; U_m 视为扰动变量。设 PI 控制器的传递函数为

$$G_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (6)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。 $\tau_i = K_p / K_i$, 分别取 $K_p = 200$, $K_i = 100$ 。

但由于三阶 LCL 滤波器的存在, 系统中可能存

在高频谐振。为此, 在上述功率控制环中加入有源功率阻尼环, 以达到有效抑制谐波的目的。

2 LCL-APF 有源功率阻尼

2.1 有源阻尼控制策略

有源阻尼控制是通过增大系统阻尼的方法来完成抑制谐振, 典型方法包括虚拟阻尼法、陷波器校正法等。虚拟阻尼是通过控制算法来实现系统的稳定性, 电容电压反馈法是一种典型的虚拟阻尼方法, 设 R 为反馈系数, 其控制框图如图 5 所示。从控制框图可以看出, 电容电压反馈法相当于无源阻尼法在电容支路上串联电阻, 但并没有额外增加电阻, 而是通过修改控制算法以增加系统阻尼, 并没有增加系统损耗, 且能达到较好的谐波抑制效果^[17]。

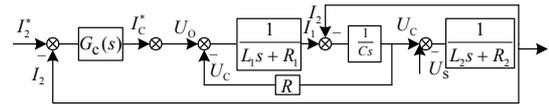


图 5 反馈电容电压系统控制框图

Fig. 5 Control diagram of feedback capacitor voltage

有源阻尼的系统框图如图 6 所示, 首先获得 abc 坐标系下的滤波电容电压 u_{Cabc} , 并将其进行 $abc/\alpha\beta$ 坐标变换得出 $u_{C\alpha\beta}$, 然后一方面利用陷波滤波器滤除电容电压基波部分获得谐振部分 $\tilde{U}_{C\alpha\beta}$, 再进行 $\alpha\beta/dq$ 变换, 将输出乘以 k_z (即 $1/R_d$, $\tilde{I}_d = k_z \tilde{u}_c$) 得到谐振补偿电流; 另一方面, 将电容电压 $u_{C\alpha\beta}$ 转化为 u_{Cdq} , 然后通过低通滤波器滤除谐波部分, 获得基波电容电压; 最后将谐振补偿电流与基波电容电压相乘获得补偿功率。

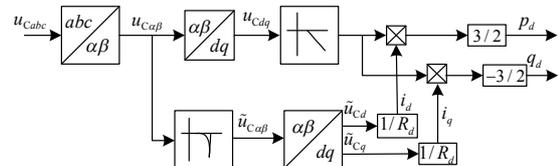


图 6 有源阻尼系统框图

Fig. 6 Block diagram of active damping

有源阻尼功率控制对应的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} p_z = \frac{3}{2} u_{Cd} k_d \tilde{u}_{Cd} \\ q_z = -\frac{3}{2} u_{Cd} k_d u_{Cd} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 性能分析

系统的波特图如图 7 所示。可以看出无源阻尼和有源阻尼都能够通过增加系统阻尼的方法有效地

抑制系统谐振使线电流中的谐波含量大大减少，避免了电流畸变；但在系统的高频段，有源阻尼比无源阻尼对开关纹波具有更好的衰减性。

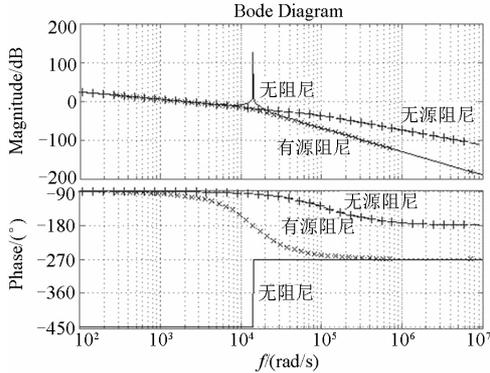


图 7 LCL 系统波特图

Fig. 7 Bode figure of LCL

3 仿真结果

为了验证上述理论的可行性，在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真电路。规定系统参数为电网相电压 $u_s = 220$ V，电网频率 $f = 50$ Hz；采用整流型 RL 负载， $R = 28 \Omega$ ， $L = 2$ mH；直流侧电容 $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$ ，LCL 滤波器参数为 $L_c = 10^{-3}$ mH， $L_g = 10$ mH， $C_f = 10^{-4} \mu\text{F}$ ；开关频率 $f_s = 10$ kHz。设置系统在 0.04 s 处把 APF 投入系统。依据工程理论，LCL 滤波器的谐振频率 $f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_g + L_c}{L_g L_c C_f}}$ ，高

于十倍工频但低于半开关频率，即 $10f_g < f_{res} < f_{sw}/2$ 。表 1 中给出了具体的仿真参数。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

f_g	f_{sw}	L_c	L_g	C_f
50 Hz	10 kHz	0.001 mH	10 mH	$10^{-4} \mu\text{F}$

图 8 为有源阻尼控制环节的有功和无功功率波形。可以看出，在谐振周期内，有源阻尼功率信号振荡较为明显，在与电源功率信号进行叠加后，有效地抑制了 LCL 滤波器引起的高频谐振。

图 9 为 APF 补偿前电流波形及总畸变率，图 10 为 APF 补偿后电流波形及总畸变率。从图 9 中可以看出，补偿前电网电流中谐波含量较大，波形存在较大失真情况，总畸变率达到 26.86%。而在 LCL-APF 进行滤波补偿之后，从图 10 中可以看出，电网电流中谐波含量大大减少，波形呈现较好的正

弦波，总畸变率降到了 3.78%。图 11 中，在 APF 投入系统之后，电源的有功功率及无功功率可以迅速跟踪参考值并保持稳定。

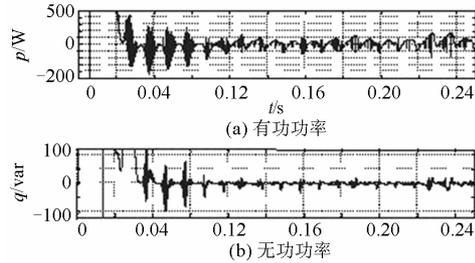
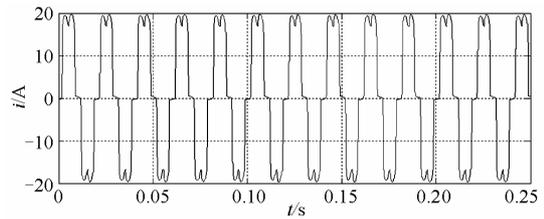
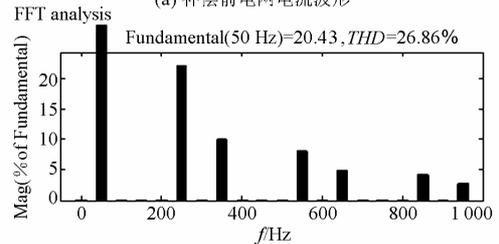


图 8 有源阻尼功率波形

Fig. 8 Waveform of active damping



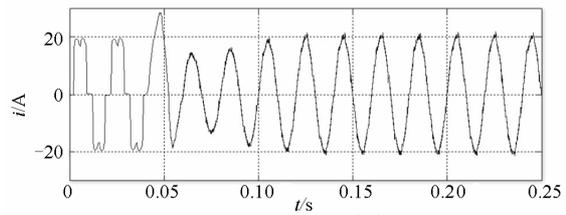
(a) 补偿前电网电流波形



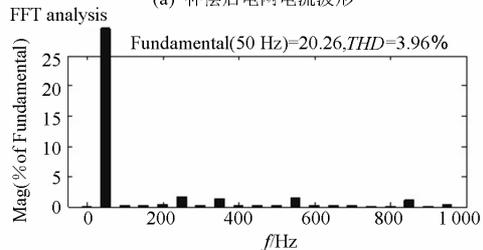
(b) 补偿前电网电流总畸变率

图 9 补偿前电网电流

Fig. 9 Grid current before compensation



(a) 补偿后电网电流波形



(b) 补偿后电网电流总畸变率

图 10 补偿后电网电流

Fig. 10 Grid current after compensation

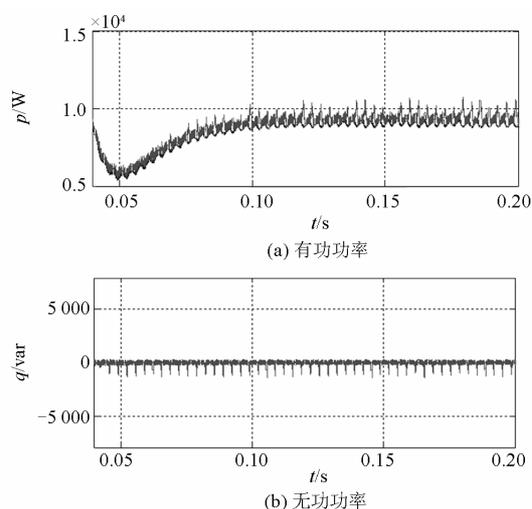


图 11 LCL-APF 电源功率

Fig. 11 Power waveform of LCL-APF

4 结论

1) 采用网侧集中补偿的方法, 对无源网络补偿后电力系统中剩余一定量的无功及谐波分量进行补偿, 使系统的电源电流畸变率从 26.86% 降到了 3.78%。

2) 采用直接功率控制的方法对 LCL-APF 进行控制, 提升了系统的动态性能; 并采用 PI+SVM 的控制方法, 使开关频率保持恒定, 有利于滤波器设计。

3) 功率控制环中有源阻尼的加入能够有效地抑制三相 LCL 滤波器引起的高频谐振, 消除了系统的谐振峰。

参考文献

- [1] 张东江, 仇志凌, 李玉玲, 等. 基于 LCL 滤波器的高稳态性能并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 137-143.
ZHANG Dongjiang, QIU Zhiling, LI Yuling, et al. Shunt active power filter with high steady-state performance based on LCL-filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 137-143.
- [2] 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.
- [3] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的不必要性(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 137-141.
WANG Guangzhu. The unnecessarys of harmonic and

- reactive current detection for active power filters—part I[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 137-141.
- [4] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的不必要性(二)——仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 132-136.
WANG Guangzhu. An investigation on the unnecessary of harmonic and reactive current detection for active power filters (part II) ——simulation and experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 132-136.
- [5] 沈玲菲, 危初勇, 徐保友, 等. 一种新型的有源电力滤波器直接功率控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 91-96.
SHEN Lingfei, WEI Renyong, XU Baoyou, et al. A novel APF direct power control approach[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 91-96.
- [6] 黄崇鑫, 王奔, 钱碧甫, 等. 基于直接功率控制的并联有源电力滤波器[J]. 电测与仪表, 2009, 46(521): 32-36.
HUANG Chongxin, WANG Ben, QIAN Bifu, et al. Shunt active power filter based on DPC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(521): 32-36.
- [7] ADBELMADJID C, JEAN-PAUL G, FATEH K. Power quality improvement using DPC controlled three-phase shunt active filter[J]. Electric Power System Research, 2010: 657-663.
- [8] 张学广, 刘义成, 王瑞, 等. 一种新型的 PWM 变换器 LCL 滤波器有源阻尼控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 188-192.
ZHANG Xueguang, LIU Yicheng, WANG Rui, et al. A novel active damping control strategy for PWM converter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 188-192.
- [9] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [10] BLASKO V, KAURA V. A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(2): 542-550.
- [11] QIAN Liu, LI Peng, YONG Kang, et al. A novel design and optimization method of an LCL filter for a shunt active power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4000-4010.
- [12] MARCO L, FREDE B. Design and control of an

- LCL-filter based on three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1291.
- [13] BRUCE S C, GEZA J. Direct power control of active filters with average switching frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 23(6): 2729-2737.
- [14] 李志勇, 沈玲菲, 徐保友, 等. 基于无谐波检测的 LCL-APF 直接功率控制[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 217-221.
- LI Zhiyong, SHEN Lingfei, XU Baoyou, et al. An LCL-APF direct power control approach based on non-harmonic detection technology[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 217-221.
- [15] 刘旺, 李志勇, 李敏, 等. LCL-APF 恒频直接功率控制的研究[J]. 低压电器, 2012(14): 30-34.
- LIU Wang, LI Zhiyong, LI Min, et al. Research of switch frequency direct power control for LCL-APF system[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(14): 30-34.
- [16] SMEDLEY K M, ZHOU Luwei, QIAO Chongming. Unified constant frequency integration control of active power filters steady-state and dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 46(3): 428-436.
- [17] 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 Zhixiong, XU Baoyou, SHEN Lingfei, 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.
-
- 收稿日期: 2014-05-09
- 作者简介:
- 李建泉(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事光伏发电系统技术和微电网技术研究工作; E-mail: lijq@csrzc.com
- 吴小云(1983-), 男, 工程师, 研究方向为光伏微电网控制技术;
- 何星瑶(1992-), 女, 硕士研究生, 从事并网逆变技术研究。
- (编辑 葛艳娜)