

# 基于PR与PI联合控制策略的光伏并网系统 直流注入抑制技术

栗晓政,孙建平,甄晓亚,刘建伟

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

**摘要:**介绍了目前几种典型的直流注入抑制方法,分析了它们在采用LCL型滤波器光伏并网系统中的适用性。利用PR控制器可无静差地跟踪交流参考量、PI控制器可无静差地跟踪直流参考量的特性,提出一种基于比例谐振(PR)与比例积分(PI)联合控制的并网逆变器直流注入控制策略,以消除并网电流中的直流分量。采用MATLAB/Simulink进行仿真研究,结果表明,与PR控制器相比,PR与PI联合控制方法可以有效抑制光伏并网系统注入电网的直流分量。

**关键词:**直流注入;联合控制;滤波器;光伏并网系统;控制

**中图分类号:** TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.020

## 0 引言

光伏(PV)发电具有平均变化率小、正调峰性能的突出优势<sup>[1]</sup>,有可能成为最具发展前景的发电技术之一。光伏并网发电系统主要由光伏阵列模块、逆变器、交流滤波和电网组成。逆变器是连接光伏阵列模块和电网的关键部件,用以实现控制光伏阵列模块运行于最大功率点和向电网注入正弦电流两大主要任务<sup>[2-3]</sup>。光伏并网系统通常利用电压源型逆变器作为和电网连接的接口,通过实时采样电网电压、电流数据形成控制指令,进而使逆变器输入电流按照相应指令注入电网实现光伏发电系统的并网发电。早期的并网逆变器系统输出端一般安装工频隔离变压器,实现电压调整和电气隔离,然而,工频隔离变压器体积大、成本高、损耗大,影响系统整机效率。因此,无工频隔离变压器的并网逆变器系统成为目前研究热点<sup>[4]</sup>。光伏发电系统采用无工频变压器并网时,并网逆变系统整体效率可以得到一定提高,但是却带来了诸如漏电流和直流注入等新的问题<sup>[5-6]</sup>。漏电流的本质是共模电流,其产生原因是光伏发电系统存在寄生的对地电容,当寄生电容-光伏发电系统-电网三者之间形成回路时,共模电压将在寄生电容上产生共模电流<sup>[7]</sup>。当光伏发电系统采用工频变压器与电网连接时,因为回路中变压器绕组间寄生电容阻抗相对较大,则回路中的共模电压产生的共模电流可以得到一定程度的抑制<sup>[7]</sup>;但是在无变压器的光伏发电系统中,回路阻抗相对较小,共模电压将在光伏系统和对地电容上形成较大的共模电流。如果逆变器具有可变的共模电压,在光

伏阵列模块和地之间会产生漏电流,威胁人身安全,并产生电磁干扰。实际应用中可以通过改进系统拓扑或调制方法来减小或消除共模电流<sup>[7]</sup>。

电力系统不允许将有较大输出直流分量的逆变器连接到电网上,因为注入电网直流分量会使变电所变压器工作点偏移,导致变压器饱和;增加电网电缆的腐蚀;导致较高的初级电流峰值,可能烧毁输入保险,引起断电;甚至可能增加谐波分量<sup>[8-9]</sup>。IEEE Std929—2000中规定光伏系统并网电流中直流分量必须小于系统额定电流的0.5%。因此,研究光伏并网直流注入问题具有重要的现实意义。

目前国内外关于光伏发电系统直流注入方面已有初步研究。采用半桥拓扑逆变器可以有效抑制直流分量注入到电网,但是与全桥逆变器相比,半桥结构需要更高的直流输入电压<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>提出一种基于直流分量检测及校正方法,理论上可实现较为理想的直流抑制效果,但是其直流抑制效果非常依赖于检测元件的精度。事实上并网电流中直流成分相对较小,低精度检测元件不仅无法实现准确的直流检测,其检测误差又将引入其他谐波成分,而高精度检测元件或检测电路又将导致成本的增加。此外,文献<sup>[11]</sup>还提出了在并网逆变器输出侧串联隔直电容的直流抑制方法。该方法虽然能有效抑制直流分量,但为了避免过大的基波压降,交流电容取值一般较大,成本较高。实际应用中,理想的电容是不存在的,电容的杂散参数将影响系统整机效率,而且电容一旦损坏引起断路,将造成电感能量无法泄放而导致过电压现象。文献<sup>[12]</sup>提出一种基于虚拟电容的直流抑制方法,采用控制方法代替隔直电容,使并网逆变器既可实现零直流注入,又可实现隔直电容零损耗,但是当光伏并网系统采用LCL型滤波器滤波时,电容隔直方法以及虚拟电容隔直方法将可能

收稿日期:2011-08-17;修回日期:2013-01-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS26)  
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12MS26)

失效。本文基于  $LCL$  型滤波器在光伏并网逆变系统广泛应用的现状,分析了现有典型直流抑制技术在采用  $LCL$  型滤波器光伏并网逆变系统中的适用性,进而提出了一种基于比例谐振(PR)与PI联合控制的直流抑制技术。该方法无需增加外围硬件电路,且只占用很少的控制芯片资源。仿真结果验证了算法的有效性。

## 1 基于 $LCL$ 型滤波器的并网逆变器控制原理分析

### 1.1 基于 $LCL$ 型滤波器的单相光伏并网逆变器原理图

采用  $LCL$  结构的滤波器比  $L$ 、 $LC$  结构有更好的衰减特性,对高频分量呈高阻态,可以抑制谐波电流,且同电网串联的电感  $L$  还可起到抑制冲击电流的作用。要达到相同的滤波效果, $LCL$  滤波器的总电感量比  $L$  和  $LC$  滤波器小得多,有利于提高电流动态性能,同时还可降低成本,减小装置的体积重量。在中大功率应用场合, $LCL$  滤波器的性能更为明显<sup>[13]</sup>。图1为典型的基于  $LCL$  型滤波器的单相并网逆变器原理图。图中光伏阵列将太阳能转换为直流电能,DC/DC 环节实现最大功率点跟踪(MPPT)控制和直流升压功能。DC/AC 逆变器输出经过  $LCL$  型滤波器连接到电网上,通过适当控制使并网电流为与电网电压同频同相的正弦波。

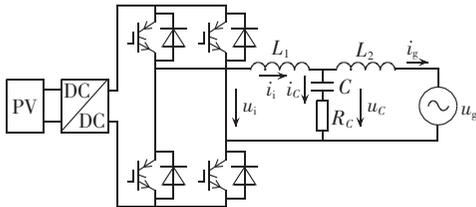


图1 基于  $LCL$  型滤波器的单相并网逆变器原理图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase grid-connected inverter based on  $LCL$  filter

### 1.2 电流控制器设计

$LCL$  型滤波器存在谐振问题,即当输入电压的频率到达某一频率值时,其阻抗为0,这将不利于系统稳定和控制设计。因此有必要在  $LCL$  型滤波器中增加阻尼设计,常见的阻尼方法有无源阻尼法和有源阻尼法<sup>[14]</sup>。电容支路串联电阻是目前广泛应用的一种无源阻尼法,它在电容支路串联一个较小的电阻即可有效抑制  $LCL$  型滤波器的谐振幅值,且使得增加的阻尼损耗较小,因此本文选取电容支路串联电阻法作为  $LCL$  型滤波器的阻尼设计方案。

传统并网电流调节一般采用PI控制,然而PI控制存在交流量静差。为了解决该问题,可采用PR控制,它可以实现对交流量的无静差跟踪,传递函数<sup>[15-16]</sup>

如下:

$$G(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

其中, $k_p$ 、 $k_i$  分别为PR控制器的基波比例控制系数和基波积分控制系数, $\omega$  为基波角频率。

当电网电压中存在谐波时,由于系统带宽有限,导致电网电压谐波在并网电感上产生谐波电流,从而导致并网电流畸变。为了减小电流畸变,可在PR控制基础上加入谐波补偿器<sup>[17]</sup>:

$$G(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega^2} + \sum_{n=3,5,7} \frac{k_{in} s}{s^2 + (n\omega)^2} \quad (2)$$

其中, $k_{in}$  为PR控制器  $n$  次谐波积分控制系数。

图1中基于  $LCL$  型滤波器的并网逆变器输出侧电路的频域方程式如式(3)所示,采用PR控制器的系统结构图如图2所示。

$$I_g(s) = \frac{(R_c C s + 1)U_i(s) - (L_1 C s^2 + R_c C s + 1)U_g(s)}{L_1 L_2 C s^3 + R_c (L_1 + L_2) C s^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (3)$$

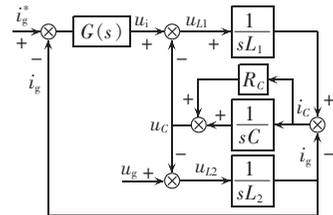


图2 并网逆变器电流环控制结构图

Fig.2 Current loop control of grid-connected inverter

从式(3)看出,输出电流  $i_g(j\omega)$  在  $\omega=0$  直流频率处不为零,因此当输出电流含有直流分量时,直流分量将注入到电网。

## 2 几种典型直流抑制技术在基于 $LCL$ 型滤波器的单相光伏并网系统中的适用性

### 2.1 电容隔直方法的适用性

如图3所示,当基于  $LCL$  型滤波器的单相并网光伏发电系统采用电容隔直方案时,即在  $L_2$  和电网之间增加一个隔直电容  $C_d$  ( $R_1$ 、 $R_2$  分别为电感  $L_1$ 、 $L_2$  的等效串联电阻, $R_c$  为限制  $LCL$  滤波器谐振的阻尼电阻),由此  $LCL$  型滤波器将变成4阶的  $LCLC$  系统。

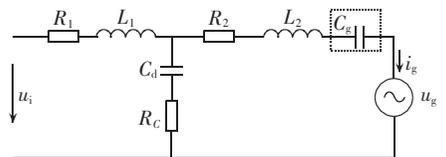


图3 加入隔直电容的  $LCL$  系统简图

Fig.3 Simplified diagram of  $LCL$  filter system with additional DC blocking capacitor

该  $LCLC$  系统的传递函数为:

$$\frac{I_g(s)}{U_i(s)} = \frac{C_d s (1 + R_c C_d s)}{D(s)} \quad (4)$$

$$D(s) = s^4 L_1 L_2 C_d^2 + s^3 [(R_2 + R_C)L_1 + (R_1 + R_C)L_2] C_d^2 + s^2 [L_1 C_d (1 + \frac{C_d}{C_g}) + (R_1 R_2 + R_1 R_C + R_2 R_C) C_d^2 + L_2 C_d] + s [R_1 + R_2 + \frac{C_d}{C_g} (R_1 + R_C)] C_d + \frac{C_d}{C_g}$$

从式(4)看出,对于 LCLC 系统其输出电流  $i_g(j\omega)$  在  $\omega=0$  直流频率处为零,能够有效抑制直流分量注入到电网。然而从图 4 所示的 LCL 系统与 LCLC 系统的波特图可以看出,隔直电容  $C_g$  的加入使得 LCL 系统的频率特性发生了明显改变:LCLC 系统具有 2 个谐振频率(在  $L_1, L_2, C_g, C_d$  参数取值为相近数量级时),这将使得 LCLC 系统的阻尼方案设计更加困难;更为重要的是,  $C_g$  的加入使得 LCL 系统的低频特性发生了剧烈变化,其对基波的衰减程度明显增加,而对 2 个谐振频率之间的低次谐波的增益却明显增加。仿真结果表明,  $L_1, L_2, C_d, C_g$  参数取值的增加可以减轻 LCLC 系统对基波的衰减程度,但同时导致 2 个谐振频率之间的低次谐波(主要为 2~6 次谐波)含量的增加,使得谐波含量无法达到相应电能质量标准。隔直电容  $C_g$  增加使得光伏并网系统更为复杂,不利于控制器的设计。虚拟电容隔直方案同样存在上述问题。

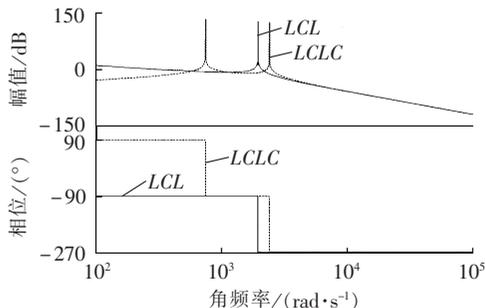


图 4 LCL 滤波器与 LCLC 系统频谱分析

Fig.4 Spectrum analysis of LCL filter and LCLC system

### 2.2 半桥拓扑逆变隔直方法的适用性

在如图 5 所示的半桥拓扑并网系统中,半桥逆变器在任何开关状态,电流通路中总存在一个电容,于是阻断了输出电流的直流分量。但与全桥逆变器相比,半桥结构需要更高的直流输入电压。仿真结果表明,当采用 SPWM 方法,若逆变器连接到 220 V 电压等级的配电网,半桥逆变器的输入电压应为 650 V

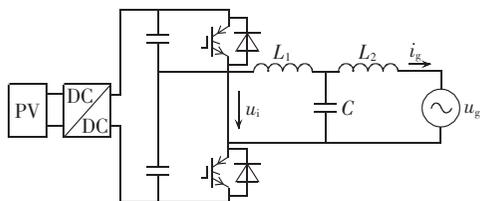


图 5 半桥拓扑逆变的单相光伏并网系统

Fig.5 Single-phase grid-connected PV system with inverter based on half-bridge topology

左右,这就需要 DC/DC 环节输出更高的直流电压,使用更高耐压等级的开关管,影响了开关频率,增加了开关损耗<sup>[10]</sup>。

## 3 基于 PR 与 PI 联合控制策略的直流抑制方法

### 3.1 PR 与 PI 联合控制原理分析

带有阻尼的 LCL 滤波器的一般性传递函数如下:

$$\frac{I_g(s)}{U_i(s)} = \frac{1 + R_C C s}{M s^3 + N s^2 + P s + R_1 + R_2} \quad (5)$$

$$M = L_1 L_2 C$$

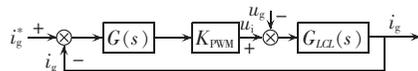
$$N = [(R_2 + R_C)L_1 + (R_1 + R_C)L_2] C$$

$$P = L_1 + L_2 + (R_1 R_2 + R_1 R_C + R_2 R_C) C$$

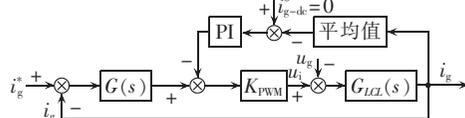
其中,  $R_1, R_2$  分别为  $L_1, L_2$  的等效电阻,  $R_C$  为电容支路的串联电阻。

PR 控制器因其可以无静差地跟踪特定频率的交流分量而广泛应用于光伏并网系统。采用 PR 控制器的光伏并网系统结构简图见图 6(a), 图中  $K_{PWM}$  为逆变器的等效放大增益, 即其输出电压基波与输入调制波的幅值比, 分析其闭环传递函数  $\Phi(s) = G(s) \times G_{LCL}(s) / [1 + G(s)G_{LCL}(s)]$  可以发现, 该系统的闭环传递函数在  $\omega=0$  直流频率处的增益为 1, 不具备隔离直流分量的功能。PI 控制器可以无静差跟踪直流量, 如果能够检测出并网电流的直流成分, 则可以通过 PI 控制将其消除。采用 PR 和 PI 联合控制的光伏并网系统结构简图见图 6(b), 图中  $i_{g-dc}^*$  为并网电流中直流分量的控制参考值, 其闭环传递函数如下:

$$\frac{I_g(s)}{I_g^*(s)} = \frac{G(s)G_{LCL}(s)}{1 + (G(s) + \frac{1}{s}G_{PI}(s))G_{LCL}(s)} \quad (6)$$



(a) PR 控制策略



(b) PR 与 PI 联合控制策略

图 6 并网光伏系统结构简图

Fig.6 Simplified structure of grid-connected PV system

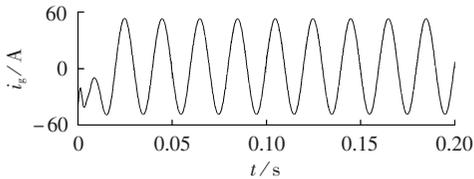
分析其闭环传递函数得:其在  $\omega=0$  直流频率处的增益为 0,可以有效隔离直流分量注入到电网。通过分析各个参数对系统零极点分布从而对系统稳定性的影响发现:  $R_C$  取值过小时,系统将具有右半平面的极点,使得系统失去稳定性,  $R_C$  取 1~2  $\Omega$  时即有效抑制 LCL 的谐振峰值;  $R_C$  取值越大,其抑制 LCL 谐振峰值的效果将越明显,系统稳定性也随之增加,但是同时会使 LCL 滤波器对高频谐波的衰减程度变

低,同时也会增加系统损耗,在对系统损耗要求很严格的场合中,可以使用虚拟电阻法降低系统的损耗<sup>[14]</sup>;PI环节的比例系数 $K_{pi}$ 取值过大会导致系统不稳定,而取值过小又影响抑制直流分量的响应时间;PI环节的积分系数 $K_{ii}$ 取值过小时将影响系统抑制直流分量的响应时间,而取值过大会导致整个系统出现明显的欠阻尼振荡;因此必须合理整定控制器的响应参数,使系统同时具有较好的稳定性和动态性能。

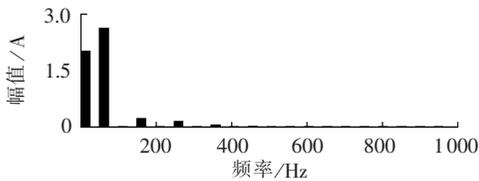
### 3.2 仿真实验与分析

本文采用MATLAB/Simulink对基于PR与PI联合控制的直流注入控制策略进行仿真研究,系统参数如下:电网电压220V/50Hz,直流母线电压400V,并网电流额定峰值50A,倍频SPWM方式,开关频率10kHz;LCL滤波器中, $L_1=2\text{mH}$ , $L_2=1\text{mH}$ , $C=400\mu\text{F}$ , $R_C=1\Omega$ ;PI控制器参数, $K_{pi}=0.05$ , $K_{ii}=5$ ;PR控制器参数, $k_{p2}=0.05$ , $k_{i2}=20$ 。

设并网参考电流为 $i_g^*=50\sin(\omega t)+2$ 。图7为无虚拟电容时的仿真结果,可以看出,并网逆变器输出电流实现零稳态误差,基波分量为50A,但并网电流中含有直流偏置成分约为2A。与3.1节分析一致,零频率处增益 $K=1$ 使得2A直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 $K$ 倍,即输出直流分量为2A。



(a) 并网电流仿真图

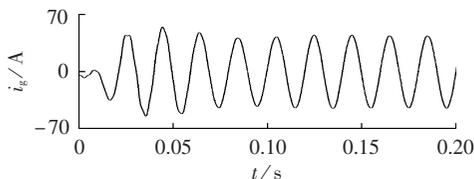


(b) 并网电流频谱图

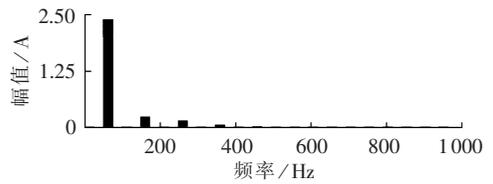
图7 并网电流及其频谱分析(PR控制策略)

Fig.7 Grid-connected current and its spectrum analysis(PR control strategy)

图8为采用PR与PI联合控制时的仿真结果,可以看出,并网逆变器输出电流中不含直流成分。与3.1节分析一致,采用PR与PI联合控制后,零频率处增益 $K=0$ 使得2A的直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 $K$ 倍,即输出直流分量为0A。



(a) 并网电流仿真图



(b) 并网电流频谱图

图8 并网电流及其频谱分析(PR与PI联合控制策略)

Fig.8 Grid-connected current and its spectrum analysis (PR & PI integrated control strategy)

## 4 结论

随着光伏发电的快速发展,单个并网光伏发电的容量以及整个电网接纳的光伏发电容量也随之增加,因此直流注入抑制是光伏并网发电系统中需要解决的关键问题之一。本文结合了在光伏并网系统中广泛使用的LCL型滤波器,分析了现有几种典型直流抑制方法的适用性,将PR控制器对交流量无静差跟踪和PI控制器对直流量无静差跟踪的特性相结合,通过检测并网电流平均值并通过PI控制器前馈至调制信号,实现了对并网电流直流分量的有效抑制。仿真实验结果验证了PR与PI联合控制方法可以实现并网逆变器零直流注入,具有原理简单、易于实现等特点,有一定工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究——可再生能源卷[M]. 北京:科学出版社, 2011:1-7.
- [2] 王飞,余世杰,苏建徽,等. 光伏并网发电系统的研究及实现[J]. 太阳能学报,2005,26(5):605-608.  
WANG Fei, YU Shijie, SU Jianhui, et al. Study and realization of photovoltaic grid-connected power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(5): 605-608.
- [3] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.  
DONG Mi, LUO An. Design and control strategies of inverters for a grid-connected photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 97-102.
- [4] GONZÁLEZ R, LÓPEZ J, SANCHIS P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 693-697.
- [5] LOPEZ O, TEODORESCU R, FREIJEDO F. Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference. Anaheim, USA: [s.n.], 2007: 907-912.
- [6] SALAS V, OLÍAS E, ALONSO M, et al. Overview of the legislation of DC injection in the network for low voltage small grid-connected PV systems in Spain and other countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(2): 575-583.
- [7] GUBÍA E, SANCHIS P, URSÚA A, et al. Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, 15(7): 629-650.

- [8] AHFOCK A, HEWITT A. DC magnetisation of transformers [J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006, 153 (4): 601-607.
- [9] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.  
LI Xiaoping, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 33-40.
- [10] 刘鸿鹏, 王卫, 吴辉. 光伏逆变器的调制方式分析与直流分量抑制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 27-32.  
LIU Hongpeng, WANG Wei, WU Hui. Modulation mode analysis and suppressing DC current of PV inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 27-32.
- [11] ARMSTRONG M, ATKINSON D J, JOHNSON C M, et al. Auto-calibrating DC link current sensing technique for transformerless, grid connected, H-bridge inverter systems [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(5): 1385-1393.
- [12] 王宝诚, 郭小强, 梅强, 等. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器直流注入控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 23-28.  
WANG Baocheng, GUO Xiaoqiang, MEI Qiang, et al. DC injection control for transformerless PV grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 23-28.
- [13] 王立乔, 孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 103-116.
- [14] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 202-219.
- [15] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an *LCL* input filter [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [16] 涂春鸣, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-58.  
TU Chunming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of injection type hybrid active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-58.
- [17] 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. Anaheim, USA: [s.n.], 2004: 580-586.

#### 作者简介:

栗晓政(1985-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电(**E-mail**: eceagle8086@gmail.com);

孙建平(1974-), 男, 河南南阳人, 副教授, 主要研究方向为新能源发电技术与先进传感检测技术(**E-mail**: sunjp@ncepu.edu.cn);

甄晓亚(1984-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术与电能质量(**E-mail**: zhenkeming022@163.com);

刘建伟(1983-), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术与电能质量(**E-mail**: liujianwei\_sun@yahoo.cn)。

## DC injection suppression technology based on PR & PI integrated control for grid-connected PV system

LI Xiaozheng, SUN Jianping, ZHEN Xiaoya, LIU Jianwei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Several typical DC injection suppression methods are introduced and their applicability to the PV (PhotoVoltaic) system based on *LCL* filter is analyzed. In order to eliminate the DC component of grid-connected current, an integrated control strategy is proposed, which adopts the PR (Proportional Resonant) controller to track the AC reference and the PI (Proportional Integral) controller to track the DC reference, without any static error. Results of simulative study with MATLAB/Simulink show that, compared with the PR controller, the PR & PI integrated control strategy effectively suppresses the DC component of grid-connected current by PV system.

**Key words:** DC injection; integrated control; electric filters; grid-connected PV system; control