

孤岛微电网的电压不平衡控制策略研究

周虎¹, 李顺福², 吴丽珍³, 杨旭生³

(1. 甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 国网甘肃省电力公司金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100;

3. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 随着微网规模的日益扩大, 微网中负载的不对称, 导致了微网电压出现不平衡。为此提出了在 $\alpha\beta$ 坐标系下的低压微网电压不平衡补偿方法。该方法包括改进的下垂控制, 可使微源逆变器根据本地配置的实际配置改善功率分配; 电压不平衡补偿环节, 协调控制分布式发电单元的有功和无功功率以自动补偿微电网电压不平衡; 并加入虚拟阻抗环来灵活地控制逆变型微源的等效输出阻抗特性; 而电压电流环则采用准比例谐振控制实现电流、电压的无静差控制。最后通过仿真结果证明了所提控制策略的有效性。

关键词: 微电网; 电压不平衡度; 下垂控制; 准比例谐振控制; 虚拟阻抗环

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2016.02.023

[中图分类号] TM712 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2016)02-0072-04

A Research on Voltage Unbalance Control Strategy for Island Micro-grids

ZHOU Hu¹, LI Shun-fu², WU Li-zheng³, YANG Xu-sheng³

(1. Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou Gansu 730030, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Co. Jinchang Power Supply Co., Jinchang Gansu 737100, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: Along with expansion of micro-grid scale, load unbalance in the micro-grid leads to voltage unbalance in the micro-grid. This paper presents a method for compensating voltage unbalance of the low-voltage micro-grid in the case of the $\alpha\beta$ coordinate system. This method includes an improved droop control for enabling the micro-source inverter to improve its power distribution according to actual local configuration, as well as a voltage unbalance compensation component for coordinating active and reactive powers of the distributed generators (DG) in their automatic compensation of voltage unbalance in the micro-grid. Furthermore, a virtual impedance loop is added for flexible control of the equivalent output impedance of the inverse micro-source. In the voltage-current loop, quasi-proportional-resonant control is adopted to realize a floating control over voltage and current. Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: micro-grid; voltage unbalance degree; droop control; quasi-proportional resonant control; virtual impedance loop

0 引言

微电网是一种将分布式电源、储能装置、负荷、变流器以及监控保护装置有机整合在一起的小型发电系统^[1]。微电网作为分布式电源的有效载体, 是分布式电源接入配电网的重要方式, 为局部消纳可再生能源提供了有效途径, 也是智能电网的重要组成部分^[2]。但在电压源型逆变器并网的低压微电网中, 基于下垂特性的对等控制带来了电压和频率的偏差, 三相负荷不对称以及非线性负载的普遍存在, 将导致微电网支撑电压出现三相不平衡, 从而造成较多的能量损失, 影响微电网系统的稳定性^[3]。当电压存在严重不平衡时, 对设备如感应电动机、电力电子转换器和调速驱动器等有严重影响, 因此, 国际电工委员会(IEC)规定电力系统中电压不平衡度应限制在2%以内^[4], 根据国标《电能质量三相电压允许不平衡度》的规定, 电力系统公共耦合点正常电压不平衡度允许值为2%, 短时不得超过4%; 接于公共连接点

的每个用户, 引起该点正常电压不平衡度允许值一般为1.3%。因此, 研究微电网电压不平衡补偿策略迫在眉睫。

现有不平衡电压补偿主要是通过串联电能质量调节器, 向线路注入负序电压^[5-6], 或者通过并联电能质量调节器补偿线路电流来实现不平衡补偿^[7-8], 但是对多逆变器的微电网成本高且容易造成调节器过流。而微电网可通过调节分布式电源(Distributed Generator, DG)逆变器输出电压的幅值和相位, 调整DG向微电网中注入的有功和无功功率, 以支撑微电网电压。因而, 文献[9]提出了注入负序电流补偿法, 使得线电流变得平衡, 以达到微电网电压不平衡补偿的目的。文献[10]通过控制负序电导来补偿DG端电压的不平衡, 应用负序无功产生一个参考的负序电导, 进而产生补偿电流, 再将补偿所需的参考量注入到输出的电压控制器中进行控制, 从而是微电网电压稳定。但文献[11]认为这种方法是不合适的, 因为电压控制器将此参考量认为是一种扰动。因此, 文献[11]提出在电压控制器之前注入补偿参考量, 达到了补偿效果。文献[12]中用一个比例积分(PI)控制器, 来跟踪参考电压的不平衡系数, 但该方法基于dq坐标系, 需要锁相环, 计算量大。因此, 本文针对多逆变器并联的微电网电压不平

定稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51467009); 兰州市科技计划项目(No. 2014-1-162), 国网科技计划项目(14-JS-188)

衡问题,提出基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系的三相电压不平衡补偿方法,采用改进的下垂控制,并加入基于正序电流的虚拟阻抗环控制,灵活地控制逆变型微源的等效输出阻抗特性;而电压电流环则采用准比例谐振控制实现电压、电流的无静差控制。

1 含多逆变器的微电网控制结构

图1为两DG并联的微电网结构图,主要由分布式直流电源 U_{dc} 、三相全桥逆变电路、LCL滤波器以及线路阻抗组成。其中, $R_1、L_1$ 为DG₁到公共耦合点(PCC)的线路阻抗, $R_2、L_2$ 为DG₂到PCC的线路阻抗, Z_B 为三相平衡负载,而 Z_{UB} 为不平衡负载连接在a、b相。

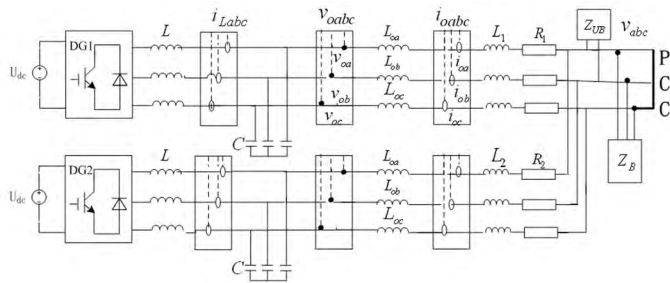


图1 两DG并联的微电网结构图

为了减少计算量,本文采用两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系及其控制原理图如图2所示。

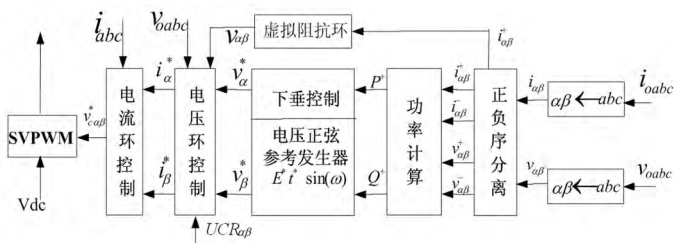


图2 DG控制结构原理图

采用二阶广义积分法进行正负序分离,得到正序、负序电压电流分量,进而求出所需的正序有功、无功功率,通过下垂控制环得出所需的电压参考幅值和相位,送入电压参考发生模块获得正弦电压参考信号,最后经过电压、电流双环控制得到输出电压,作为脉冲信号控制逆变器。

2 多逆变器并联的微网电压不平衡补偿控制方法

2.1 正负序分离及功率计算

将逆变器输出的电压、电流信号利用两相静止坐标系变换到 $\alpha\beta$ 坐标下,对于三相三线制系统而言,不考虑零序分量问题。将 abc 变换到 $\alpha\beta$ 坐标系,所需要的变换矩阵为 $T_{\alpha\beta}$,变换公式如下所示:

$$T_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{\alpha\beta} &= T_{\alpha\beta} [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \\ i_{\alpha\beta} &= T_{\alpha\beta} [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \end{aligned} \quad (2)$$

依据二阶广义积分 SOGI 正负序分离的原理,对输入电压信号进行 90° 相角偏移,以此获得两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压或电流正负序分量,其正负序分离计算公式:

$$\begin{aligned} v_{\alpha\beta}^+ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -e^{j90^\circ} \\ e^{j90^\circ} & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \\ v_{\alpha\beta}^- &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & e^{j90^\circ} \\ -e^{j90^\circ} & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_{\alpha\beta}^+ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -e^{j90^\circ} \\ e^{j90^\circ} & 1 \end{bmatrix} i_{\alpha\beta} \\ i_{\alpha\beta}^- &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & e^{j90^\circ} \\ -e^{j90^\circ} & 1 \end{bmatrix} i_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

此外,以二阶广义积分 SOGI 正负序分离的原理获得两相正交电压信号,此方法不仅可以实现对输入电压信号进行正负序分离,还可以滤除高次谐波^[13]。

基于瞬时无功功率理论^[14],有功无功的瞬时值计算如下:

$$p = v_{\alpha\alpha} i_{\alpha\alpha} + v_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} \quad (5)$$

$$q = v_{\alpha\beta} i_{\alpha\alpha} - v_{\alpha\alpha} i_{\alpha\beta} \quad (6)$$

其中 $v_{\alpha\alpha}$ 和 $v_{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 下的两相基波电压; $i_{\alpha\alpha}$ 和 $i_{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 下的两相基波电流。

瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 包含了直流分量和交流分量,其中,直流分量即为基波正序,基波正序有功功率 P^+ 和无功功率 Q^+ 可通过低通滤波器滤除 p 和 q 的交流分量得到。其中,所用的一阶滤波器传递函数如下:

$$LPF = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (7)$$

式中 ω_c 为截止频率。

2.2 改进的V/f下垂控制

由于传统的下垂控制取自虚拟同步发电机的下垂特性曲线,一般认为输出阻抗是感性的,因而通过有功功率来调节频率基准,无功功率来调节电压基准。DG输出的基波正序有功功率和无功功率为^[15]:

$$P^+ = \left(\frac{EV}{Z} \cos\phi - \frac{V^2}{Z} \right) \cos\theta + \frac{EV}{Z} \sin\phi \sin\theta \quad (8)$$

$$Q^+ = \left(\frac{EV}{Z} \cos\phi - \frac{V^2}{Z} \right) \sin\theta - \frac{EV}{Z} \sin\phi \cos\theta \quad (9)$$

其中 E 为DG逆变器输出相电压; V 为电网电压; ϕ 为 E 与 V 之间的相角差; Z 和 θ 分别为连接阻抗的幅值和相角,设定电网电压的相角为 0 , ϕ 则为逆变器电压相角。当连接阻抗 Z 接近感性,即有 $Z \approx X$ 和 $\theta \approx 90^\circ$ 时,则有功和无功为:

$$P^+ \approx \frac{EV}{X} \sin\phi \quad (10)$$

$$Q^+ \approx \frac{EV \cos\phi - V^2}{X} \quad (11)$$

由此可见,有功功率 P 主要取决于逆变器输出电压与母线电压相位差,无功功率 Q 主要取决于逆变器输出电压幅值 V 。又因为电压相角差和角频率之间满足关系式: $\omega = d\phi/dt$ 。因此,可以采用PQ下垂控制法,通过调节有功功率来改变输出角频率,进而实现电压相角差的控制,通过调节无功功率来实现电压幅值的控制。图3-a是有功/频率下垂曲线,曲线由初始运行点的 f_0 和

P_0 以及下垂系数 m 确定。图3-b为无功/电压下垂曲线,由初始运行点的 V_0 和 Q_0 以及下垂系数 n 确定。假设系统工作在 A 点,当系统输出有功功率增大到 P_1 时,系统频率将减小到 f_1 ,系统将工作在 B 点,而频率降低又会增加有功输出,从而实现功率自动平衡。同样无功/电压下垂曲线也有类似的下垂规律。

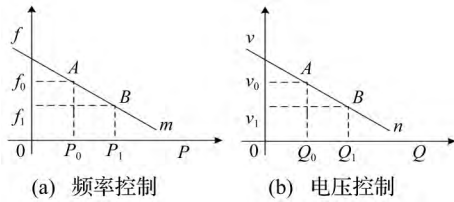


图3 下垂控制原理

传统的下垂控制虽然能解决简单的功率和幅值的控制,但当线路阻抗、本地负荷不同时,会产生功率分配的误差,造成系统的稳定性受到影响。为此本文提出的下垂控制方法公式如(12)和(13)所示。

$$\phi^* = \frac{\omega^*}{s} = \frac{1}{s} [\omega_0 - (m_p + m_D s) P^*] \quad (12)$$

$$E^* = E_0 - n_p Q^* \quad (13)$$

其中 E^* 、 ϕ^* 为参考电压幅值、参考电压相角, m_p 为下垂有功比例系数, n_p 为无功比例系数, m_D 为有功微分系数。为了增加响应速度,在下垂控制中增加微分响应系数 m_D ,增加微分系数有助于改善动态功率控制; ω_0 、 E_0 分别为额定角频率和额定电压幅值。通过 $P-f$ 、 $Q-E$ 下垂控制,各分布式电源能独立调节输出基波频率、电压幅值。因此,各分布式逆变器之间可以实现有功、无功较为精确的分配。

2.3 虚拟阻抗环

下垂控制只有在 $X \gg R$ 的条件下,无功出力才主要由电压幅值来控制,但是在低压微网中,输出线路主要体现为阻性即 $R > X$,加入虚拟阻抗可以使 $P-f$ 、 $Q-E$ 下垂控制适用于阻性线路,但虚拟阻抗会导致压降过大以及谐波放大。针对此问题本文运用负阻抗,利用原电压减去逆变器输出电流在虚拟负电阻上的压降作为最终的电压,达到用算法模拟虚拟负电阻作用的目的;用虚拟负电阻抵消一部分线路电阻,从而在同样的效果下,减小虚拟阻抗的取值,提高电压质量。因此本文在逆变器单元中加入虚拟负阻抗环节,以补偿线路阻抗大小不一致而造成的无功出力不均,其设计原理框图如图4所示。

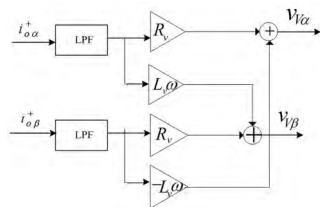


图4 虚拟阻抗环原理框图

图4的方程表示为:

$$v_{V\alpha} = R_v i_{\alpha\alpha}^+ - L_v \omega i_{\alpha\beta}^+ \quad (14)$$

$$v_{V\beta} = R_v i_{\alpha\beta}^+ + L_v \omega i_{\alpha\alpha}^+ \quad (15)$$

其中 R_v 、 L_v 为虚拟电阻、电感。图4中只有正序电流通过虚拟负阻抗,这样避免了由于DG输出而引起的负序电压不平衡,补偿了线路阻抗大小不一致而造成的无功出力不均。而且,虚拟负阻抗没有功率损耗,它不会减少效率,使得下垂控制更

稳定^[16]。

2.4 电压电流环控制

因为基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的电压和电流为交流分量,所以用准比例谐振 PR (proportional resonant) 控制器来进行 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的电压、电流误差信号控制。通过 PR 控制器,使系统在谐振频率处实现零稳态误差。PR 电压、电流控制器传递函数为^[17]:

$$G_V(s) = k_{pV} + \frac{2k_{rV} \cdot \omega_{CV} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{CV} \cdot s + \omega_0^2} \quad (16)$$

$$G_I(s) = k_{pI} + \frac{2k_{rI} \cdot \omega_{CI} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{CI} \cdot s + \omega_0^2} \quad (17)$$

k_{pV} 、 k_{rV} 是比例谐振中电压、电流控制系数; ω_{CV} 、 ω_{CI} 是电压、电流控制器的截止频率。

3 仿真结果分析

为验证上述控制方法的有效性,基于 MATLAB/Simulink 软件,搭建了如图1所示含有2个分布式电源的仿真实验平台,主电路和控制系统的仿真参数如表1、表2。

表1 主电路参数

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	650	R_1/Ω	0.6
L/mH	2	R_2/Ω	0.2
$C/\mu F$	15	Z_{UB}/Ω	660
L_1/H	1.695 9	Z_B/Ω	$50 + j12$
L_2/H	0.565 5	$C_1/\mu F$	5

表2 控制系统参数

m_p	n_p	m_D	ω_0	R_v/Ω	L_v/mH	F_0/V			
0.002	0.15	0.000 18	100* pi/s	1	5	$230\sqrt{2}$			
k_{pV}	k_{rV}	k_{rI}	k_{pI}	ω_{CV}	ω_c	ω_{CI}	k_p	k_I	
1.5	1000	80	10	2	3	2	0.8	10	

仿真时 DGs 逆变器的开关频率为 10 kHz,在 $t=0.5$ s 时加入电压不平衡补偿环节。

根据文献[15],电压不平衡度 (Voltage Unbalance Factor, VUF) 可定义为负序电压分量与正序电压分量之比,其公式如下:

$$VUF = \frac{\bar{v}_{\alpha}^-}{\bar{v}_{\alpha}^+} \cdot 100\% = \frac{|v_{\alpha}^-| \cdot LPF}{230\sqrt{3} \cdot \frac{2}{\pi}} \cdot 100\% \quad (18)$$

其中 \bar{v}_{α}^- 为 DG 逆变器输出电压的负序分量有效值。LPF 为本文上述中已介绍的一阶低通滤波器。

采用本文提出的电压不平衡补偿策略,在控制策略中计算出每个 DG 端口的输出电压正负序分量的有效值,并可获得不平衡度 VUF,其仿真结果如图5所示。

设参考电压不平衡补偿度 $VUF^* = 1\%$,在 $t=0.5$ s 时加入电压不平衡补偿环节,由图5可以看出,补偿前各个 DG 的电压不平衡度大于 3%,而加入补偿环节后各个 DG 的电压不平衡度有了明显的下降,约为 0.5%,由此可见电压不平衡补偿的效果较好。但由于在正负序分离的计算中有误差,故电压不平衡并未完

全消除。

DG₁ 端点补偿前后的电压波形如图6所示,可以看出由于a、b相所加不平衡负载,导致DG₁三相电压不平衡,但在 $t=0.5\text{ s}$ 应用本文所提出的不平衡补偿方法后,使的补偿后三相电压平衡(DG₂类同)。DG₁端点补偿前后的电流波形如图7所示,可以看出,由于所加不平衡负载的原因a相与b相的电流基本相等而c相的电流接近于零。不平衡的负载电流导致了电压的不平衡,加入不平衡补偿环节之后,三相电流整体有所增加,但c相电流增加的较为明显,减小了电流不平衡,从而减小了电压不平衡。

为了进一步说明补偿效果,其补偿前后输出功率波形如图8所示,可以看出,在 $t=0.5\text{ s}$ 时加入不平衡补偿环节,由于对不平衡电压、电流进行了补偿,负序电压电流减小,从而使得负序无功功率有明显的下降;同样,正序电压电流通过补偿得以提高,使得正序功率也相应的有所提高,即有功功率得到补偿。以上结果表明,所提出控制方法能有效地进行电压不平衡补偿,且动态性能良好。

4 结束语

本文对微电网接不平衡负载所造成的电压不平衡问题进行了研究,提出了基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系的一种微电网多逆变器不平衡补偿方法,运用不平衡补偿方法对DG₁和DG₂端的电压、电流进行补偿。通过仿真可以看出,该方法能有效的补偿微电网不平衡电压,动态性能良好。最后仿真验证了该方法的正确性和有效性。但是,本文所提出来的方法仅讨论了带线性负载所造成的电压不平衡问题,对于接入非线性负载的情况还有待进一步深入研究。

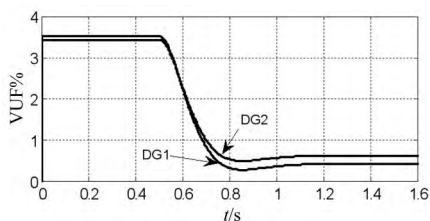


图5 DGs的VUF

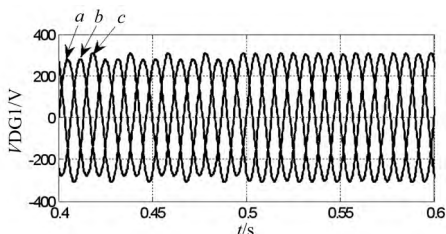


图6 DG₁的补偿前后电压波形

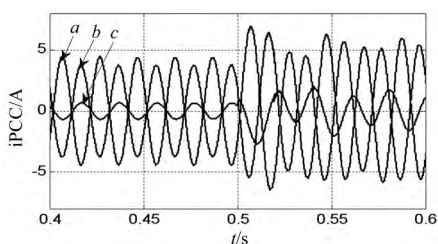


图7 DG₁的电流波形

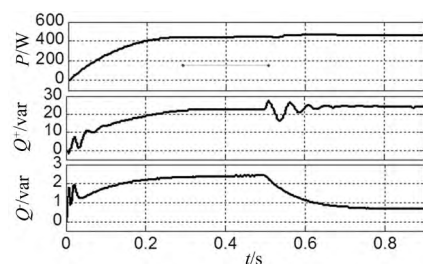


图8 功率补偿比较

参考文献:

- [1] CLAUDIO A CAÑIZARES, RODRIGO PALMA-BEHNKE. Trends in microgrid control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1918.
- [2] RITWIK MAJUMDER. Some aspects of stability in microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2013 28(3): 3243-3252.
- [3] JIN PENG, AI XIN, WANG YONGGANG. Reactive power control strategy of microgrid using potential function method [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(25): 44-51.
- [4] A V JOUANNE, B BANERJEE, Assessment of voltage unbalance [J]. IEEE Trans Power Del, 2001, 16(4): 782-790.
- [5] F BARRERO, S MARTINEZ, F YEVES, et al. Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning [J]. IEEE Trans Power Del 2003 18(1): 283-290.
- [6] D GRAOVAC, V A KATIC, A RUFER. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system [J]. IEEE Trans Power Del 2007 22(2): 968-976.
- [7] A G CERRADA, O P ARDILA, V F BATLLE, et al. Application of a repetitive controller for a three-phase activepower filter [J]. IEEE Trans on Power Electron 2007 2(1): 237-246.
- [8] A CHANDRA, B SINGH, B N SINGH, et al. An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correction, and balancing of nonlinear loads [J]. IEEE Trans on Power Electron 2000 15(3): 495-507.
- [9] M HOJO, Y IWASE, T FUNABASHI, et al. A method of three phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems [J]. Power Electron. Motion Control Conf. (EPE-PEMC), 2008, 22(3): 2487-2491.
- [10] P T CHENG, C CHEN, T L LEE, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed generation interface converters [J]. IEEE Trans on Ind. Appl, 2009 45(2): 805-815.
- [11] M SAVAGHEBI, J M GUERRERO, A JALILIAN, et al. Experimental evaluation of voltage unbalance compensation in an islanded microgrid [C]. 20th IEEE Int. Symp. Ind. Electron 2011: 1453-1458.
- [12] M SAVAGHEBI, A JALILIAN, J C VASQUEZ, et al. Distributed generator with voltage unbalance compensation capability [C]. In Proc. 25th Int. PowerSyst. Conf. (PSC2010): 1-10.
- [13] 薛艘. 基于二阶广义积分器的基波正负序分量-检测方法 [J]. 电子自动化设备 2011, 31(11): 69-73.
- [14] A MEHRIZI-SANI, R IRAVANI. Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes [J]. IEEE Trans Power Syst 2010 25(4): 1883-1891.
- [15] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2007 22(4): 1007-1115.
- [16] SHUNGANG X, JIANPING X. Parallel control strategy of single-phase inverter based on virtual impedance [C]. Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 589-592.
- [17] 周洁, 罗安, 陈燕东. 低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 415-417.

【作者简介】周虎(1973-)男,甘肃兰州人,硕士,高级工程师;电力系统稳定与控制分布式发电及微电网的运行与控制。