

三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法

翦志强, 司徒琴

(深圳市金宏威技术股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了满足光伏并网逆变器在三相电网电压不对称跌落情况下的低电压穿越能力的要求, 提出了一种电流正负序同步旋转坐标独立控制的方法, 以抑制负序电流和并网电流谐波, 使得光伏并网逆变器在三相电网电压不平衡跌落过程中能够正常运行, 且不影响电网电能质量。特别地, 对电网电压正负序分量的检测进行了详细研究, 分析了两种不同的电网正负序分量检测方法的优缺点, 优选一种方法进行了实验验证。所提出的低电压穿越控制方法通过了国家电网的零电压穿越认证, 证明了该技术方案的有效性。

关键词: 低电压穿越; 三相不平衡; 光伏并网逆变器; 控制方法; 正负序分量检测

Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips

JIAN Zhiqiang, SITU Qin

(Shenzhen Golden Highway Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: To meet the requirements to low voltage ride-through (LVRT) capability of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips, this paper proposes a current positive sequence synchronous rotational coordinate independent control method. In the strategy, the positive and negative sequence component is controlled independently. So that the negative sequence current and the grid current harmonics can be restrained. So the photovoltaic grid-connected inverter can work well at LVRT situation, and shall not affect the power quality of power grid. The positive and negative sequence component detection of the grid voltage are studied in detail and the pro and con of two detection methods are analyzed and one of them is selected and verified. The LVRT method proposed has passed the no voltage ride-through certification, which verifies the effectiveness of the proposed technical solution.

Key words: low voltage ride-through; three phase unbalance; photovoltaic grid-connected inverter; control method; detection of positive and negative sequence component

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0126-05

0 引言

近年来, 随着我国光伏发电装机容量的增加, 其在区域电网中所占的比重越来越高, 因此光伏逆变器对电网安全稳定运行的影响也越来越大。新的并网接入规则要求大中型光伏逆变器应具备零电压穿越能力, 即在电网电压短暂跌落时, 光伏逆变器仍然正常运行, 在向电网输出功率的同时, 能向电网提供无功功率以支持电网恢复, 直到电网恢复正常。因此, 研究光伏逆变器在网侧发生瞬时故障时的低电压穿越能力具有非常重要的现实意义^[1]。

电网的跌落分为三相对称跌落和三相不对称跌落两种情况。三相不对称跌落通常是由单相接地短路、两相接地短路或两相之间短路故障引起。在这

种情况下, 电网电压会出现严重的不对称情况, 作为大型并网光伏电站, 要求此时其能保持并网运行且能向电网提供无功功率, 为电网稳定性提供一定的支持。在三相电网电压严重不对称且光伏逆变器输出一定功率的情况下, 在电网负序电压的作用下将会在交流侧产生负序电流, 使得三相交流电流出现不平衡, 同时增加了交流电流中的奇次谐波电流分量, 影响了电能质量。因此, 需要研究在三相电压不对称跌落时光伏并网逆变器抑制负序电流分量和谐波分量的控制方法。

在风力发电领域, 低电压穿越控制技术的研究比较成熟^[2-3], 而在光伏发电领域目前的研究还比较少。文献[4]提出了一种在电网不平衡下基于滑模变结构的三相电压型 PWM 整流器的恒频控制。文献

[5]提出了一种基于电压定向矢量的控制策略,并增加直流侧的卸荷电路来抑制直流侧电压的波动,但是未考虑在三相电压不对称跌落情况下的控制且需要增加额外的硬件电路。文献[6]提出基于正序旋转坐标系中的前馈控制策略,利用负序分量的前馈来抑制负序分量的影响,但是该前馈的负序分量存在二次谐波,无法彻底抑制负序分量的影响。因此,本文提出一种正序同步旋转坐标系和负序同步旋转坐标系独立控制的策略,以抑制在电网电压短时不对称跌落期间的负序电流分量和电流谐波,保证光伏逆变器能正常并网运行。

1 原理与设计

1.1 电网不平衡时正负序分量描述

在三相电压不平衡的情况下,如果只考虑电网的基波分量,则电网电压 $\dot{U}=[u_a, u_b, u_c]$ 可以分解为正序基波分量 $\dot{U}_1=[u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}]$ 、负序基波分量 $\dot{U}_2=[u_{2a}, u_{2b}, u_{2c}]$ 和零序基波分量 \dot{U}_0 ,即 $\dot{U}=\dot{U}_1+\dot{U}_2+\dot{U}_0$ 。其中,对于三相无中线系统,可以忽略零序分量的影响,即 $\dot{U}_0=0$,从而化简为 $\dot{U}=\dot{U}_1+\dot{U}_2$ 。

将三相静止坐标系转换成两相同步旋转坐标系,则上式可写为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = C_{32} \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{bmatrix} + C_{32} \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: u_a, u_b, u_c 为三相电网电压; C_{32} 为静止坐标变

换矩阵, $C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$; $\mathbf{R}(\theta)$ 为正序旋转坐标

变换矩阵, $\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$; $\mathbf{R}(-\theta)$ 为负序

旋转坐标变换矩阵, $\mathbf{R}(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$; 而

u_{1d} 、 u_{1q} 分别表示三相电网正序电压的 d 、 q 分量;

u_{2d} 、 u_{2q} 分别表示三相电网负序电压的 d 、 q 分量。

三相电网电压复矢量 $U_{\alpha\beta}$ 在复平面静止坐标系下可以表示为

$$U_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} [u_a + u_b e^{j2\pi/3} + u_c e^{-j2\pi/3}] \quad (2)$$

将其转换到两相同步旋转坐标系,在三相电网不平衡条件下,电网电压可表示为

$$U_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} U_{1dq} + e^{-j\omega t} U_{2dq} \quad (3)$$

式中: ω 是电网电压角频率; U_{1dq} 和 U_{2dq} 分别是同步旋转坐标系中电网电压的正序、负序复矢量。其中

$$\begin{cases} U_{1dq} = u_{1d} + j u_{1q} \\ U_{2dq} = u_{2d} + j u_{2q} \end{cases} \quad (4)$$

三相电网不平衡情况下,在电网电压负序分量的作用下,将在交流侧产生负序电流分量。只考虑基波分量,则三相电流同样在两相同步旋转坐标系下可描述为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{32} \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + C_{32} \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在三相电网电压严重不平衡且光伏逆变器输出功率较大的情况下,该负序电流的存在使得并网光伏逆变器输出交流电流出现不平衡。另一方面电流的负序分量与正序开关函数的乘积,以及电流正序分量与负序开关函数的乘积将使得逆变器直流电流中产生二次谐波分量。该谐波电流经直流电容滤波后,将在直流电压中产生二次谐波。而直流电压中的二次谐波与基波开关函数的乘积使得交流电流产生三次谐波电流。如此反复,光伏逆变器直流电压中将存在2、4、6、...等偶次谐波电压分量,而在交流电流中存在3、5、7、...等奇次谐波电流分量,严重影响电网电能质量^[7]。

1.2 三相电压不平衡控制策略

三相光伏逆变器常规的基于电网电压平衡时所设计的单正序同步旋转坐标系下的PI环路控制策略,如图1所示。其中: u_a, u_b, u_c 为三相电网电压检测值; i_a, i_b, i_c 为三相输出电流检测值; u_{dc}^* 为直流母线电压的给定参考值; u_{dc} 为直流母线电压的检测值; i_d 和 i_q 分别为正序旋转坐标下的 d 轴和 q 轴检测分量; i_d^* 和 i_q^* 为给定参考值; u_d 和 u_q 分别为电网电压的 d 轴和 q 轴分量; s_a, s_b, s_c 为PWM开关量。

该控制策略是以电网电压为正序电压作为基础,采用三相坐标系到正序同步旋转坐标系变换,调节电流的 d 轴分量 i_d 从而调节逆变器的输出有功

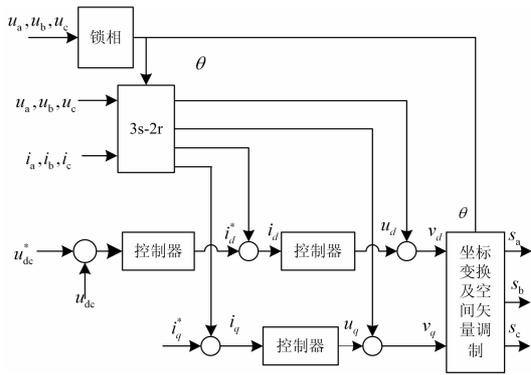


图 1 基于电网电压平衡的控制方法框图

Fig. 1 Block diagram of control method based on balanced grid voltage

功率。在电网不对称故障发生且逆变器以一定功率输出时，由于电网不对称产生了负序电流，在两相正序同步旋转坐标系中有

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + \mathbf{R}(-2\omega t) \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

可见，负序电流表现为二次谐波分量。正序旋转坐标系下的电流 PI 控制仅可以实现直流分量的无静差跟踪，也就是说仅可以控制正序电流分量，对于表现为二次谐波的负序电流分量无能为力，因此需要对负序分量进行单独控制。

本文提出了一种控制策略，即采用结构完全对称的正、负序旋转坐标系对正、负序电流独立进行控制，并采用电网的正序和负序电压瞬时值作为调节器的前馈，其控制框图如图 2 所示。图中 i_{1d} 、 i_{1q} 、 i_{2d} 、 i_{2q} 分别为网侧电流的正序 d 、 q 轴分量和负序

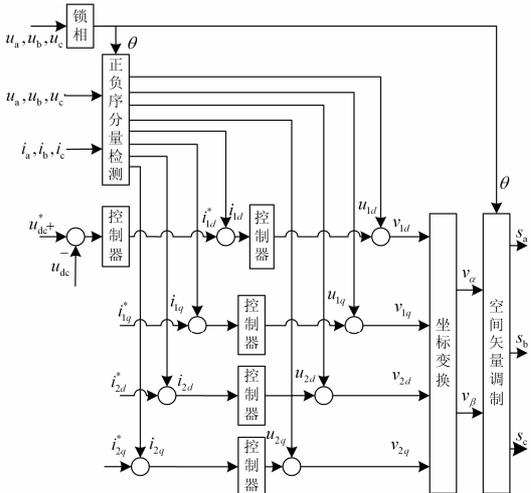


图 2 电网电压不平衡控制方法框图

Fig. 2 Block diagram of control method based on unbalanced grid voltage

d 、 q 轴分量； i_{1d}^* 、 i_{1q}^* 、 i_{2d}^* 、 i_{2q}^* 分别为网侧电流的正序 d 、 q 轴分量和负序 d 、 q 轴分量的参考值； u_{1d} 、 u_{1q} 、 u_{2d} 、 u_{2q} 分别为电网电压的正序 d 轴分量、正序 q 轴分量、负序 d 轴分量和负序 q 轴分量。

该电流控制环路采用了四个并行的 PI 控制器，分别控制输出电流的正序 d 轴、正序 q 轴、负序 d 轴、负序 q 轴分量。并且都加入了电网电压的正负序分量瞬时值作为前馈^[8]，以提高环路的响应速度。

1.3 电网正负序分量的检测

在三相电网不平衡控制策略中，一个关键点是三相电压和三相电流正负序分量的检测。文献[9]提出解耦多轴系的检测方法，文献[10]提出一种改进瞬时对称分量法，这两种方法都需要比较复杂的数学运算，工业上实现比较复杂。在两相正序同步旋转坐标系下，原先的三相交流正序电压变成直流量，而负序电压变成二次谐波分量。为了得到正序电压分量，一种常见方法是采用滤波器滤除二次谐波分量^[11]，即负序分量，剩下的正序分量经过两相同步旋转坐标系到三相静止坐标系的转换后得到三相正序电压 $[u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}]$ 。电网电压 $[u_a, u_b, u_c]$ 减去正序电网电压 $[u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}]$ 即可获得三相负序电网电压 $[u_{2a}, u_{2b}, u_{2c}]$ 。

使用的滤波器一般为低通滤波器或者陷波器。陷波器的角频率可以设计为 2 倍的基波角频率，这样就可以滤除 2 次谐波分量，而对除 2 次谐波以外的信号基本上没有影响。陷波器传递函数为

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + Qs + \omega_0^2} \quad (7)$$

其中： ω_0 为基波角频率，陷波角频率为 $2\omega_0$ ，即两倍的基波角频率； Q 为品质因数，用来调节陷波深度。

陷波器滤波效果的好坏取决于滤波器参数的选取，其中最关键的是滤波带宽，如果带宽过大，则动态响应慢，但是如果带宽过小，则不适应频率变化。使用陷波器会增加控制系统阶数，对控制系统的动态和稳态性能有一定影响，而且数字陷波器本身有延时，难以满足目前标准对低电压穿越响应时间的要求。

下面讨论另外一种检测方法—— $T/4$ 延时法，其中 T 为电网电压工频周期。在两相静止坐标系中， t 时刻 α 轴上和 β 轴上的电压分别用正负序分量表示有

$$\begin{cases} U_{\alpha}(t) = U_{1\alpha}(t) + U_{2\alpha}(t) \\ U_{\beta}(t) = U_{1\beta}(t) + U_{2\beta}(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $U_{\alpha}(t)$ 为 t 时刻电网电压 α 轴上的分量; $U_{\beta}(t)$ 为 t 时刻电网电压在 β 轴上的分量; $U_{1\alpha}(t)$ 为正序电压 α 轴分量; $U_{2\alpha}(t)$ 为负序电压 α 轴分量; $U_{1\beta}(t)$ 为正序电压 β 轴分量; $U_{2\beta}(t)$ 为负序电压 β 轴分量。将 $U_{1\alpha}(t)$ 、 $U_{2\alpha}(t)$ 、 $U_{1\beta}(t)$ 和 $U_{2\beta}(t)$ 分别表示为

$$\begin{cases} U_{1\alpha}(t) = U_1 \cos(\omega t + \theta^+) \\ U_{2\alpha}(t) = U_2 \cos(-\omega t + \theta^-) \\ U_{1\beta}(t) = U_1 \sin(\omega t + \theta^+) \\ U_{2\beta}(t) = U_2 \sin(-\omega t + \theta^-) \end{cases} \quad (9)$$

其中: U_1 为正序分量的幅值; U_2 为负序分量的幅值; θ^+ 为正序分量初始相位; θ^- 为负序分量初始相位。

因此式(8)可以表示为

$$\begin{cases} U_{\alpha}(t) = U_1 \cos(\omega t + \theta^+) + U_2 \cos(-\omega t + \theta^-) \\ U_{\beta}(t) = U_1 \sin(\omega t + \theta^+) + U_2 \sin(-\omega t + \theta^-) \end{cases} \quad (10)$$

同理, 两相静止坐标系中, 延时 $T/4$ 时刻的电网电压可以表示为

$$\begin{cases} U_{\alpha}(t - T/4) = U_1 \sin(\omega t + \theta^+) - U_2 \sin(-\omega t + \theta^-) \\ U_{\beta}(t - T/4) = -U_1 \cos(\omega t + \theta^+) + U_2 \cos(-\omega t + \theta^-) \end{cases} \quad (11)$$

利用式(10)、式(11)可求得正负序分量的表达式为

$$\begin{cases} U_{1\alpha}(t) = \frac{1}{2}(U_{\alpha}(t) - U_{\beta}(t - T/4)) \\ U_{1\beta}(t) = \frac{1}{2}(U_{\alpha}(t - T/4) + U_{\beta}(t)) \\ U_{2\alpha}(t) = \frac{1}{2}(U_{\alpha}(t) + U_{\beta}(t - T/4)) \\ U_{2\beta}(t) = \frac{1}{2}(U_{\beta}(t) - U_{\alpha}(t - T/4)) \end{cases} \quad (12)$$

以上就是 $T/4$ 延时算法求正负序分量的推导过程, 采用 $T/4$ 延时法仅通过算术运算来实现正负序分量的分离, 而未增加控制系统阶数, 所以基本不影响控制系统的稳定性, 而且仅需延时 $T/4$, 响应时间快, 如电网频率为 50 Hz, 则只需延时 5 ms, 能够满足低电压穿越标准的 30 ms 内要求。

2 实验

为验证理论分析的正确性, 研制了 50 kW 并网光伏逆变器样机, 额定输出电压为 290 V, 开关频

率为 18 kHz。图 3、图 4 为光伏逆变器工作在 90% 额定功率即 45 kW, B 相电网电压暂态跌落到 20% 额定电压的实验波形。图中 CH1 为 AC 线电压波形, CH2 为 BC 线电压波形, CH3 和 CH4 为其中两相电流波形。其中图 3 为采用单正序同步旋转坐标系下的 PI 环路控制策略的实验波形, 图中电流波形出现畸变, 由于实验中光伏逆变器的交流输出接的是电网模拟器来模拟电网跌落, 因此交流电压波形也受到电流的影响, 产生了一定的畸变。图 4 为采用正负序电流独立控制策略的实验波形。从图中可以看出, 采用本文所述的电流控制策略后, 在电网电压三相不对称跌落过程中, 光伏并网逆变器交流输出电流谐波小, 三相电流基本平衡。

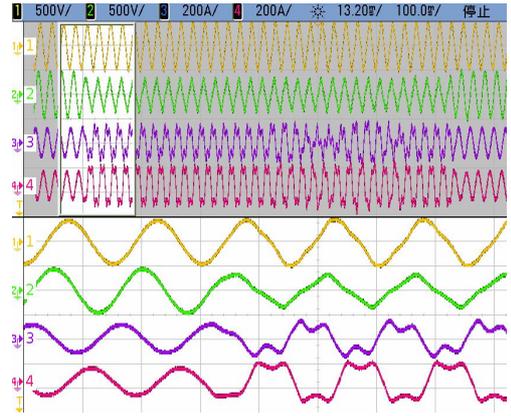


图 3 三相电网电压不对称跌落时电压电流波形 (常规的基于三相平衡的控制策略)

Fig. 3 Voltage and current waveform when three-phase grid voltage unbalanced drop (conventional control strategy based on balanced grid voltage)

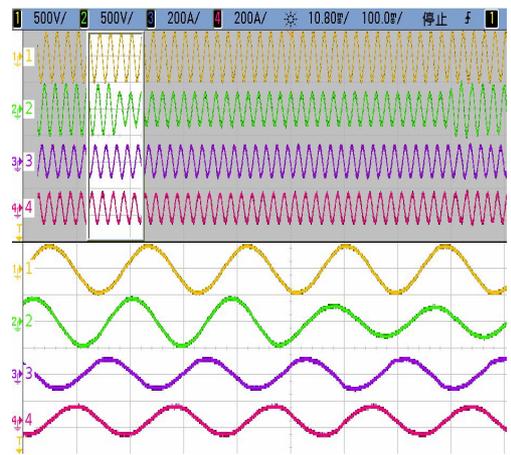


图 4 三相电网电压不对称跌落时电压电流波形 (本文所提的控制策略)

Fig. 4 Voltage and current waveform when three-phase grid voltage unbalanced drop (the proposed control strategy in this paper)

3 结论

本文针对光伏并网逆变器在低电压穿越认证过程中的三相电网电压不对称跌落情况,提出了一种抑制负序电流的控制策略,从而保证在电网电压跌落期间光伏逆变器输出电流的稳定,使用该控制策略的光伏逆变器已通过国家电网的零电压穿越认证,证明了该控制策略切实有效。

参考文献

- [1] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析-(1)光伏电站专题[J]. 电力系统保护控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG Dezhou, WANG Liping, ZHANG Jun, et al. Modeling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics-(1) photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.
- [2] 蔚兰, 陈国呈, 宋小亮, 等. 一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 171-175.
YU Lan, CHEN Guocheng, SONG Xiaoliang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 171-175.
- [3] 李和明, 董淑慧, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [4] 郭旭刚, 金新民, 马添翼, 等. 电网不平衡下基于滑模变结构的三相电压型 PWM 整流器恒频控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 126-133.
GUO Xugang, JIN Xinmin, MA Tianyi, et al. Constant frequency control for three-phase voltage PWM rectifier under unbalanced grid voltage conditions based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 126-133.
- [5] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [6] PASCAL R, HERVE P, JEAN-PAUL L. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [7] SEONG-JEUB J, LEE F C. Three control strategies for a three-leg AC-DC converter under unbalanced AC voltage condition[C] // IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE, 2003, Roanoke, Virginia, USAA.
- [8] 张彦, 赵义术, 余蜜, 等. 光伏并网逆变器电流控制技术[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 29-31.
ZHANG Yan, ZHAO Yishu, YU Mi, et al. Research on current control of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2009, 43(5): 29-31.
- [9] 李珊瑚, 杜雄, 王莉萍, 等. 解耦多同步参考坐标系电网电压同步信号检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 183-189.
LI Shanhu, DU Xiong, WANG Liping, et al. A grid voltage synchronization method based on decoupled multiple synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 183-189.
- [10] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jingyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58.
- [11] 张兴, 季建强, 张崇巍, 等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51-56.
ZHANG Xing, JI Jianqiang, ZHANG Chongwei, et al. Study of internal model control based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 51-56.

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2014-12-02

作者简介:

葛志强(1974-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子技术在电力与新能源领域的应用;

司徒琴(1982-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子技术在电力与新能源领域的应用; E-mail: situqin@jhw.com.cn

(编辑 葛艳娜)