

不平衡情况下基于新型正负序分量检测的 多电平逆变器控制策略

谢云至¹, 汪可友¹, 李国杰¹, 黎建²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电气工程系, 上海 200240;

2. 国电云南电力有限公司, 云南 昆明 650021)

摘要: 电网电压不平衡情况下的系统控制策略是大规模光伏系统并网运行需要解决的关键问题之一。分析了电网电压不平衡情况下光伏系统的输出功率流, 在此基础上推导出并网电流参考指令。提出一种新的检测正序、负序分量的方法—模值检测法, 该方法基于电网电压矢量的模值和正序、负序矢量的模值之间的数学关系, 在 $\alpha\beta$ 坐标系下实现了电网电压正序、负序分量的检测。该方法具有几何概念清晰、计算量小的优点。最后在电网不平衡情况下对系统控制方案进行了仿真验证, 仿真结果验证了提出方法的有效性。

关键词: 多电平逆变器; 不平衡电网电压; 正序分量; 负序分量; 并网控制

Control strategy of multi-level inverter based on a new method for detecting positive and negative sequence components under unbalanced grid voltage conditions

XIE Yun-zhi¹, WANG Ke-you¹, LI Guo-jie¹, LI Jian²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion under Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Guodian Yunnan Power Co., Ltd, Kunming 650021, China)

Abstract: Control strategy under unbalanced grid voltage conditions is one of the most important issues for grid integration of high penetration photovoltaic (PV) systems. The output power flow of PV systems is analyzed and the reference instruction of grid-connected current is deduced. Module value detection method is developed, which is a new method for detecting the positive and negative sequence components. The method realizes the detection of the positive and negative sequence components in $\alpha\beta$ coordination based on mathematical relationship between the module value of the space vector and that of the positive sequence vector and negative sequence vector. It has the advantages of clear geometrical concept and low calculation cost. Finally, the simulation is carried out under the unbalanced grid voltage conditions. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050204).

Key words: multi-level inverter; unbalanced grid voltage; positive sequence component; negative sequence component; grid-connected control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0074-07

0 引言

随着经济的发展和社会的进步, 传统石化能源的大量消耗使人类的可持续发展面临着严峻的考验。以太阳能为代表的新能源因其无污染、可再生、

分布广泛, 越来越受到人们的重视和利用, 而太阳能光伏并网是太阳能利用的主要发展趋势。与传统的两电平逆变器相比, 多电平逆变器由于输出具有更低的谐波含量、更高的输出波形质量、开关器件承受的耐压应力减小而寿命延长等优点, 因而在高压大功率场合得到了广泛的应用^[1]。随着大规模光伏系统接入电力系统, 光伏系统和电网之间的互相影响日益凸显。当电网发生不对称故障时, 电网存

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划 (2012AA050204); 国家国际科技合作合作专项 (2013DFG71630)

在的不平衡负序分量将导致光伏系统输出有功功率波动和输出电流畸变, 会影响光伏并网逆变器的正常运行^[2-4]。因此, 研究光伏并网逆变器的控制技术, 消除它对电网的负面影响, 保证并网逆变器在电网不平衡情况下安全运行, 对实现光伏发电系统高效稳定并网运行具有重要意义。

在电网发生不对称故障时, 为了确保光伏并网逆变器仍能具有良好的运行性能, 需要设计出对应的控制策略。Rioual P 等人提出基于正序 dq 旋转坐标系中的前馈控制策略, 即构建前馈-反馈复合控制系统, 利用负序分量的前馈来抑制负序分量对并网逆变器的控制影响^[5]。可是该方案使得正序 dq 坐标系中的负序分量中存在 2 次谐波, 不能实现彻底地对负序分量的抑制和消除。为了解决此问题, Hong-Seok Song 等人提出了同时采用正序、负序同步旋转坐标系的独立控制方法, 该控制方法的实现是通过将正序、负序基波分量在各自的同步旋转坐标系中进行转换, 使其成为相应的直流分量, 通过常规 PI 调节器实现无静差控制, 因此该方案是一个较为完善的控制方案^[6]。

电网电压的正序、负序分量检测是电网不平衡条件下并网控制的重要环节。文献[7-9]采用对称分量法, 以电力系统中常用的分析工具“对称分量”为基础, 需要将信号相移 120° 或 90°, 再经过对称分量矩阵运算后得到正序和负序分量; 文献[10-12]采用基于瞬时无功功率的方法来实时检测电力系统中的负序分量、谐波分量和基波无功分量, 但是此类方法都需要以基波正序电压波形为参考, 因而只能检测电流, 不能检测电压, 并且也不能把谐波和基波负序分量相隔离。文献[13-14]采用的延时方法来分离电网电压正序与负序分量, 利用了正负序特性和对称分量法。但该类方法涉及到三角函数运算, 算法复杂并且一旦电网频率发生波动, 该方法将无法准确分离电网正序和负序分量。文献[15]采用基于带通或带阻滤波器的检测方法, 不过过分依赖于滤波器参数的调整, 动态响应延时比较大, 不能很好地满足正序、负序分量分离的快速性要求。文献[16]提出基于旋转坐标系的三角函数法, 具有瞬时对称分量法一样的动态响应速度, 但也涉及到了大量三角函数运算, 计算较复杂。

针对多电平光伏并网逆变器矢量控制本身计算量大, 已有的正序、负序检测方法计算较复杂的问题, 本文提出一种算法简单, 计算量小的正序、负序分量检测方法——模值检测法。该方法基于电网电压矢量的模值和正序、负序矢量的模值之间的数学关系, 实现了电网电压的正序、负序快速、准确的分离检测, 为多电平光伏逆变器在电网电压不平

衡情况下的运行控制提供可靠信息和依据。

1 三电平光伏逆变器电路

图 1 为典型三电平光伏并网逆变器原理图, 其中直流母线电压 V_{dc} 由光伏电池经过 DC/DC 升压提供。DC/AC 逆变桥输出经过电感 L 连接到电网上, 通过间接或直接调节交流侧电流实现逆变器并网运行。

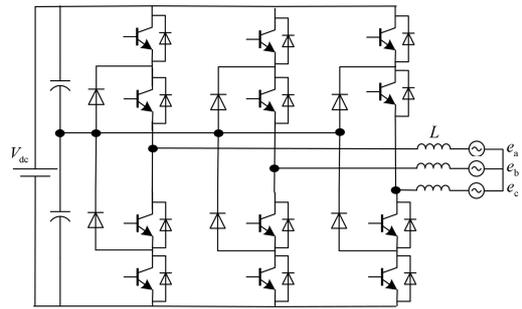


图 1 三电平光伏并网逆变器

Fig. 1 Three-level PV grid-connected inverter

在三电平逆变器中每个桥臂由四个开关管、四个续流二极管、两个箝位二极管等组成, 箝位二极管与直流母线上两个电容的中点连接。

每个桥臂有三个开关状态(P、O、N), 在三相三电平逆变器中共有 27 个开关状态, 这 27 个开关状态组成了 19 个空间矢量。这些矢量根据幅值不同可分为四组: 零矢量、小矢量、中矢量大矢量。零矢量有三个开关状态, 小矢量有两个开关状态, 而中矢量大矢量只有一个开关状态。每组矢量对中点电压的影响是不同的。为了计算空间矢量作用时间, 空间矢量图分为六个扇区, 每个扇区分为四个三角形, 如图 2 所示。当参考电压矢量 \vec{V}_{ref} 位于某一个三角形时, 选择三个最近的空间矢量合成参考电压矢量。

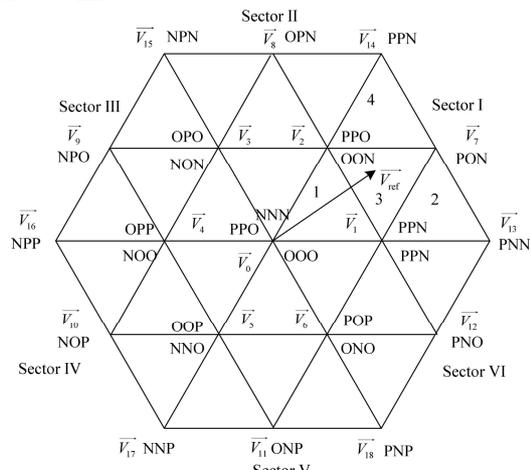


图 2 三电平逆变器的空间矢量图

Fig. 2 Graph of space vectors of three-level inverter

三电平逆变器直流母线中点电压波动根源来自于中矢量。虚拟空间矢量控制^[17]将中矢量的作用时间部分分配给临近的小矢量，并保留适当的中矢量作用时间以保证输出电压的平滑性。第 I 扇区的虚拟空间矢量图如图 3 所示。第 I 扇区中，大矢量和零矢量与图 2 保持一致，虚拟小矢量和虚拟中矢量通过重新定义，将第 I 扇区分为五个小扇区，对参考矢量所在扇区采用 NTV 原则，计算得到各虚拟空间矢量的作用时间。

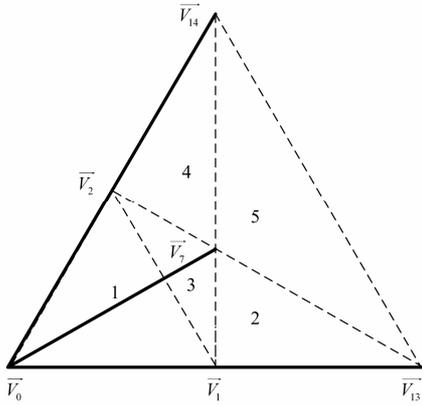


图 3 第 I 扇区虚拟空间矢量图

Fig. 3 VSV diagram in sector I

2 电网电压正序、负序检测

如果电网电压不平衡，并且仅考虑基波电动势，设三相电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c 和并网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} e_m^p \sin(\omega t + \theta^p) + e_m^N \sin(-\omega t + \theta^N) \\ e_m^p \sin(\omega t - 120^\circ + \theta^p) + e_m^N \sin(-\omega t - 120^\circ + \theta^N) \\ e_m^p \sin(\omega t + 120^\circ + \theta^p) + e_m^N \sin(-\omega t + 120^\circ + \theta^N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_m^p \sin(\omega t + \varphi^p) + i_m^N \sin(-\omega t + \varphi^N) \\ i_m^p \sin(\omega t - 120^\circ + \varphi^p) + i_m^N \sin(-\omega t - 120^\circ + \varphi^N) \\ i_m^p \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi^p) + i_m^N \sin(-\omega t + 120^\circ + \varphi^N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： e_m^p 、 i_m^p 、 θ^p 、 φ^p 分别为正序电网电压和并网电流的幅值和相位； e_m^N 、 i_m^N 、 θ^N 、 φ^N 分别为负序电网电压和并网电流的幅值和相位； ω 为同步频率。

光伏并网控制在电网不平衡情况下的运行过程中需要计算电网电压正序分量 e_d^p 、 e_q^p 和负序分量 e_d^N 、 e_q^N 。

本文提出一种基于模值检测法的正序、负序分量计算方法，在 $\alpha\beta$ 坐标系下实现正序、负序矢量模值的检测。由于不需要经过旋转坐标变换，因此该方法具有原理简单、便于实现、运算量小等特点。

当三相电网电压不平衡时，电网电压矢量包含正序、负序分量。在 $\alpha\beta$ 坐标系下，电网电压 e^{PN} 以椭圆形的轨迹逆时针旋转；电网电压正序矢量 $e^{j\omega t} e^p$ 是一模为 $|e^p|$ 且按照逆时针方向以角频率 ω 旋转的空间矢量；而电网电压负序矢量 $e^{j\omega t} e^N$ 则为模为 $|e^N|$ 且按照顺时针方向以角频率 ω 旋转的空间矢量。

正序和负序矢量在 $\alpha\beta$ 坐标系中以相同的角速度、相反的方向旋转。那么当两个矢量同向时 $|e^{PN}|$ 最大（如图 4 所示），背向时 $|e^{PN}|$ 时最小。即

$$\begin{cases} \text{MAX}|e^{PN}| = |e^p| + |e^N| \\ \text{MIN}|e^{PN}| = |e^p| - |e^N| \end{cases} \quad (3)$$

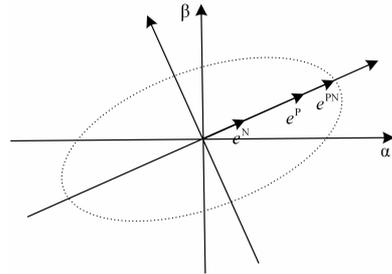


图 4 电网电压矢量 $|e^{PN}|$ 最大时刻

Fig. 4 The maximum time of the voltage vector $|e^{PN}|$

求解式(3)可得正序和负序矢量的模为

$$\begin{cases} |e^p| = (\text{MAX}|e^{PN}| + \text{MIN}|e^{PN}|) / 2 \\ |e^N| = (\text{MAX}|e^{PN}| - \text{MIN}|e^{PN}|) / 2 \end{cases} \quad (4)$$

如图 5 所示，正序矢量 e^p 和 dq 坐标系以相同的角速度 ω 逆时针旋转。由软件锁相环计算出正序矢量 e^p 和 d 轴的夹角 φ ，那么正序分量 e_d^p 、 e_q^p 为

$$\begin{cases} e_d^p = |e^p| \cos \varphi \\ e_q^p = |e^p| \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

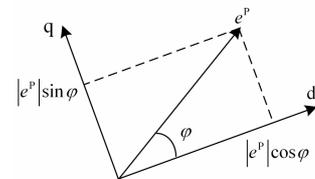


图 5 正序矢量作旋转坐标变换

Fig. 5 Coordination transformation of positive vector

电网电压正序分量 e_d^P 、 e_q^P 和负序分量 e_d^N 、 e_q^N ，图 7 (c) 为采用本文提出的模值检测法计算出的电网电压正序分量 e_d^P 、 e_q^P 和负序分量 e_d^N 、 e_q^N 。可以看出，两种方法都在 0.005 s 内计算出电网电压正序、负序分量，但是，延时法计算出来的正序、负序分量波形暂态波动较大；模值检测法计算出来的正序、负序分量波形比较平滑，可以为并网电流参考指令提供更加准确和有效的电压信息。

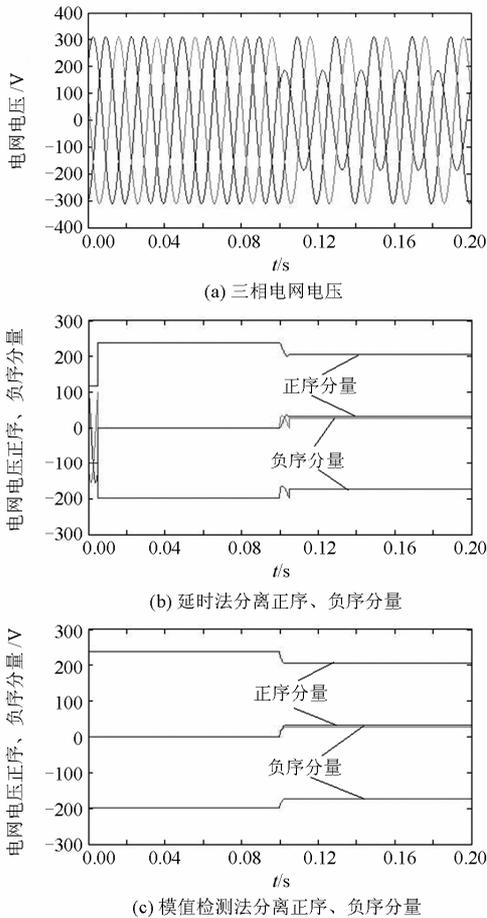


图 7 延时法与模值检测法比较

Fig. 7 Delay method vs. module detection method

4.2 基于模值检测法的光伏并网控制仿真结果

当电网 A 相电压在 0.3 s 时跌落至 60%，采用模值检测法检测电网电压正序、负序分量，然后计算并网电流参考指令，控制目标是直流侧电压二次谐波为零。仿真结果如图 8 所示：图 8 (a) 是三相电网电压波形，图 8 (b) 和图 8 (c) 是交流侧电流及其正序、负序分量波形，图 8 (d) 是直流侧电压波形。可以看出，直流侧电压在电网不平衡的情况下能够很好地稳定在 700 V，达到预期控制目标。

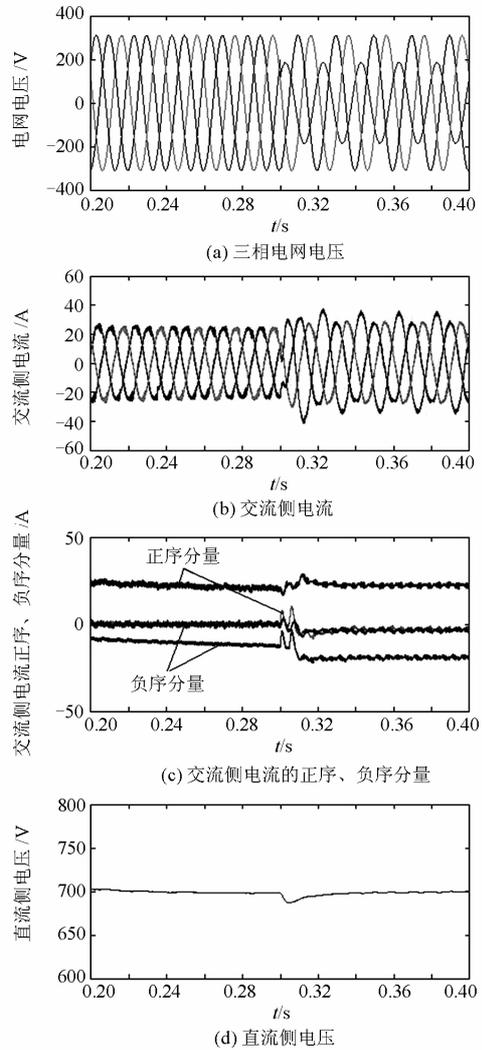


图 8 光伏并网仿真结果

Fig. 8 Simulation results of PV grid-connected

5 结论

本文论述了电网电压不平衡情况下多电平光伏逆变器的并网控制策略，采用一种新的检测电网电压正序、负序分量的方法——模值检测法，该方法计算量小，响应时间快。仿真结果证实该方法的有效性和准确性，与延时法相比，本文所提模值检测法的正序、负序分量波形效果更好。采用模值检测法实现了电网电压正序、负序分量的准确计算，多电平光伏逆变器的并网控制策略在电网电压不平衡情况下达到了预期控制目标。

参考文献

[1] 马兰珍, 王明渝, 徐四勤, 等. 新型多电平光伏并网逆

- 变频器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 72-77.
- MA Lan-zhen, WANG Ming-yu, XU Si-qin, et al. Study on control scheme based on new multi-level photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 72-77.
- [2] 胡胜, 林新春, 康勇. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 21-29.
- HU Sheng, LIN Xin-chun, KANG Yong. An improved control strategy of doubly-fed induction generator under grid voltage unbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 21-29.
- [3] 姚骏, 陈西寅, 廖勇, 等. 电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 99-106.
- YAO Jun, CHEN Xi-yin, LIAO Yong, et al. Control strategy of a direct-driven permanent-magnet synchronous generator wind turbine under unbalanced grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 99-106.
- [4] 章玮, 王宏胜, 任远, 等. 不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 103-110.
- ZHANG Wei, WANG Hong-sheng, REN Yuan, et al. Investigation on control of three-phase grid-connected inverters under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 103-110.
- [5] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [6] SONG H, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [7] PAAP G. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [8] TIMBUS A. Grid monitoring and advanced control of distributed power generation systems[D]. Denmark: Aalborg University, 2007.
- [9] GHARTEMANI M K, IRAVANI M R. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [10] 王继东, 刘琨, 高彦静. 基于瞬时无功功率理论的电压波动检测和闪变计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 145-150.
- WANG Ji-dong, LIU Kun, GAO Yan-jing. Detection for voltage fluctuation and flicker calculation based on the instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 145-150.
- [11] 何英杰, 刘进军, 王兆安. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 185-192.
- HE Ying-jie, LIU Jin-jun, WANG Zhao-an. A digital method for detecting harmonic currents based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 185-192.
- [12] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. dq0 坐标系下广义无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176-179.
- LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, DING Qiao-lin, et al. Definition of generalized instantaneous reactive power in dq0 coordinates and its compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 176-179.
- [13] SVENSSON J, BONGIORNO M, SANNINO A. Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 18-26.
- [14] 郑征, 王聪, 葛广凯, 等. 电网不平衡条件下 PWM 整流器正负序分量新计算方法[J]. 武汉大学学报, 2010, 31(14): 47-56.
- ZHENG Zheng, WANG Cong, GE Guang-kai, et al. A new calculation algorithm of positive and negative

- sequence component of PWM converter under voltage unbalance condition. Engineering[J]. Journal of Wuhan Universtiy, 2010, 31(14): 47-56.
- [15] RODRIGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [16] 刘红, 杜睿, 苏昭晖, 等. 一种基于旋转坐标系的新型正负序提取方法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(14): 47-56.
LIU Hong, DU Rui, SU Zhao-hui, et al. A novel method for calculating positive and negative sequence component in rotating frame[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(14): 47-56.
- [17] 胡存刚, 王群京, 李国丽, 等. 基于虚拟空间矢量的三电平 NPC 逆变器中点电压平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 100-107.
HU Cun-gang, WANG Qun-jing, LI Guo-li, et al. A neutral-point potential balancing algorithm for three-level inverter based on virtual-space-vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 100-107.
- [18] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [19] RODRIGUEZ P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1798-1801.

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-08-06

作者简介:

谢云至(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为多电平光伏逆变器并网控制; E-mail: 1110319116@sjtu.edu.cn

汪可友(1979-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源; E-mail: wangkeyou@sjtu.edu.cn

李国杰(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源控制与接入、微电网分析与控制。