

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.004

电网电压不平衡下逆变器功率波动平抑策略

朱晓青, 严威, 李圣清

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 电网电压的不平衡会使得光伏并网逆变器输出功率产生波动, 为了消除这种不利影响, 提出一种基于正序电压提取下的功率波动平抑策略。通过自适应陷波滤波器实现采样电压正序分量的提取, 消除使得功率产生波动的分量, 从而消除光伏并网逆变器输出功率的波动, 实现对光伏并网逆变器的输出功率的有效控制。最后通过模型仿真和实验研究验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 不平衡电网电压; 并网逆变器; 正序电压; 功率波动

中图分类号: TM712; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2018)03-0018-05

Power Fluctuation Suppression Strategy of the Inverter Under Unbalanced Grid Voltage

ZHU Xiaoqing, YAN Wei, LI Shengqing

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The imbalance of grid voltage will lead to the fluctuation of the output power of PV grid-connected inverter. In view of the elimination of this adverse effect, a proposal has thus been made of the power fluctuation suppression strategy based on positive sequence voltage extraction. By using the adaptive notch filter, an extraction can be achieved of the positive sequence components of sampled voltage, thus eliminating the components that result in the power fluctuation, with an effective control of the output power of PV grid connected inverter realized. Finally, the feasibility and effectiveness of the method can be verified by a model simulation and experimental research.

Keywords: unbalanced grid voltage; grid-connected inverter; positive sequence voltage; power fluctuation

1 研究背景

当电网电压不平衡时, 由于负序分量的影响, 会使得并网逆变器输出的功率出现波动, 如果直接并网, 会进一步影响电网的电能质量。因此, 对于不平衡电网电压下的光伏并网逆变器控制, 是目前新能源并网的一个重要研究方向^[1-3]。

L. Harnefors 等^[4]提出采用比例谐振 (proportional resonant, PR) 控制器的支持向量机 (support vector machine, SVM) 控制策略, 对于一些设定的频率能

够实现稳态误差为零, 使得对系统的控制具有较好的精度, 提高了控制系统的控制性能, 但是在对连续时间系统与离散时间系统进行转换时, 相位裕度时滞响应会使得系统的频率稳定性和鲁棒性反而变差。孙强等^[5-6]提出基于矢量旋转坐标系下脉宽调制逆变器调制方法, 通过选取合理的电感电压矢量进行脉宽调制, 并利用旋转坐标系下电感电流矢量调制有效地实现了对控制系统的线性化处理和解耦控制, 而且在锁相环节进行简化, 提高了控制系统的响应速度。

收稿日期: 2018-04-02

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2017JJ4024), 湖南省教育厅开放基金资助项目 (15k036), 湖南省重点实验室基金资助项目 (2016TP1018)

作者简介: 朱晓青 (1958-), 男, 湖南长沙人, 湖南工业大学教授, 主要从事过程检测与控制技术方面的教学与研究, E-mail: 1724948964@qq.com

全宇等^[7]提出基于谐振滑模的直接功率控制策略, 通过在静止坐标系下建立的谐振滑模控制策略提高了对相位检测的精度, 并通过对6倍频谐振项的引入, 使得控制系统对功率跟踪的精度、输出电流质量以及无功功率稳定性等方面都有较大的提高, 有效地实现了有功和无功的解耦控制。沈永波等^[8]提出了基于静止坐标系下并网逆变器的直接功率控制策略, 通过采用降阶广义积分器实现了对电压基频分量的提取, 使得系统响应速度变快并有利于谐波的准确分离, 提高了系统的动态响应特性, 且利用矢量比例积分谐振器对功率波动分量进行了有效控制, 最后实现了对功率和电流的独立控制, 保证了并网逆变器输出功率和电流的稳定性。

基于静止坐标系下的控制策略, 有计算量小、时延短、动态响应快等特点^[9-10]。因此, 本文提出一种基于正序电压提取下的功率波动平抑策略。即通过在静止坐标系下对输出的有功和无功功率进行分析, 得知负序电压和功率波动有着直接关系, 然后利用自适应陷波滤波器 (adaptive notch filter, ANF) 提取出采样信号中电网电压的正序分量, 有效地消除了逆变器输出有功和无功功率的波动, 实现了不平衡电网电压下逆变器输出有功和无功功率的稳定。

2 光伏并网逆变器主电路拓扑结构

图1所示为光伏并网逆变器的主电路拓扑结构示意图。

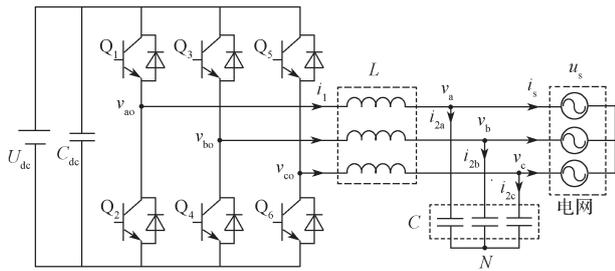


图1 光伏并网逆变器的主电路拓扑结构

Fig. 1 The main circuit topology of the photovoltaic grid connected inverter

图1中, Q_i ($i=1\sim 6$) 为开关管, v_{a0} 、 v_{b0} 、 v_{c0} 分别为逆变器的A、B、C三相输出电压, v_a 、 v_b 、 v_c 分别为电网的A、B、C三相电压, i_{2a} 、 i_{2b} 、 i_{2c} 分别为流入电容的A、B、C三相电流, i_s 为逆变器并网电流, u_s 为电网电压, L 、 C 为滤波器的2个组成部分, N 为接地点。光伏阵列所发出的电, 经过最大功率跟踪电路和Boost电路升压后, 得到直流电压 U_{dc} ; 得到的 U_{dc} 再通过逆变器逆变过程得到所需频率的交流

电。由于并网逆变器具有高频开关器件, 使得逆变时产生谐波, 会对电网的电能质量产生不利影响。因此, 采用LC滤波器衰减其高频谐波分量, 以提高并网时的电能质量。

当电力系统中出现单相接地、断线、谐振等故障时, 电网电压会出现不平衡现象, 此时光伏并网逆变器的运行性能及输出的电能质量都会大幅度降低。因此, 要使光伏发电并网能够高效运行, 就必须对光伏并网逆变器采取适当的控制措施, 以提高光伏并网时所需的各项指标。

由基尔霍夫电压电流定律可得, 在 $\alpha\beta$ 静止坐标系中的光伏并网逆变器的数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{u_{0\alpha}}{L} - \frac{u_{s\alpha}}{L}, \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{u_{0\beta}}{L} - \frac{u_{s\beta}}{L}, \\ \frac{du_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{C} i_{2\alpha}, \\ \frac{du_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{C} i_{2\beta}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{1\alpha}$ 、 $i_{1\beta}$ 分别为逆变器输出电流在 α 轴、 β 轴的分量; $i_{2\alpha}$ 、 $i_{2\beta}$ 分别为经过电容 C 的电流在 α 轴、 β 轴的分量; $u_{0\alpha}$ 、 $u_{0\beta}$ 分别为逆变器输出电压在 α 轴、 β 轴的分量; $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 分别为电网电压在 α 轴、 β 轴的分量。

3 不平衡电网下逆变器的控制策略

首先, 通过坐标变换, 将电网电压转换到 $\alpha\beta$ 静止坐标系中, 然后在 $\alpha\beta$ 静止坐标系中对其瞬时电压进行分析。对各瞬时电压进行等幅值的 $abc/\alpha\beta$ 变换, 所得表达式如下:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^+ \cos(\omega t + \theta_1) \\ U^+ \sin(\omega t + \theta_1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^- \cos(\omega t + \theta_2) \\ -U^- \sin(\omega t + \theta_2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: u_{α}^+ 、 u_{α}^- 分别为 u_{α} 的正、负序分量; u_{β}^+ 、 u_{β}^- 分别为 u_{β} 的正、负序分量; ω 为角频率; θ_1 、 θ_2 分别为电网电压正、负序相角。

通过陷波器消除电流表达式分母中的正弦分量 $2U^+U^- \cos(2\omega t)$, 进而抑制并网电流的谐波^[11], 通过陷波器处理后的有功、无功电流表达式如下:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^*}{(U^+)^2 + (U^-)^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ + u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^+ + u_{\beta}^- \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{Q^*}{(U^+)^2 + (U^-)^2} \begin{bmatrix} u_{\beta}^+ + u_{\beta}^- \\ -u_{\alpha}^+ - u_{\alpha}^- \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在电网电压不平衡的情况下,电压所含负序分量会对并网逆变器输出功率产生不利影响,使其产生波动。因此,可以利用负序电压所产生的那一部分功率的平均功率来表示功率的波动,根据瞬时功率理论可得功率的表达式为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_{\alpha p} & i_{\beta p} \\ i_{\alpha q} & i_{\beta q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ + u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^+ + u_{\beta}^- \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将式(4)~(5)代入式(6)中可得:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} (u_{\alpha}^+ + u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^+ + u_{\beta}^-)^2 \end{bmatrix}}{(U^+)^2 + (U^-)^2} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将式(2)~(3)代入式(7)中可得:

$$p = P^* \left[1 + \frac{2U^+U^- \cos(2\omega t + \theta_1 + \theta_2)}{(U^+)^2 + (U^-)^2} \right], \quad (8)$$

$$q = Q^* \left[1 + \frac{2U^+U^- \cos(2\omega t + \theta_1 + \theta_2)}{(U^+)^2 + (U^-)^2} \right]. \quad (9)$$

由式(8)~(9)可得,逆变器输出功率产生2倍频波动的部分主要是后面的一部分,因此功率波动分量可以表示如下:

$$\tilde{p} = \frac{2U^+U^-}{(U^+)^2 + (U^-)^2} P^* \cos(2\omega t + \theta_1 + \theta_2), \quad (10)$$

$$\tilde{q} = \frac{2U^+U^-}{(U^+)^2 + (U^-)^2} Q^* \cos(2\omega t + \theta_1 + \theta_2). \quad (11)$$

由式(10)~(11)可知,如果使得该功率波动部分等于0,就可以有效保证逆变器输出功率的恒定。通过对电网电压进行采样后,只提取电网电压中正序电压分量传递给控制系统,使得功率波动分量的值为零,进而消除逆变器输出功率的波动。

通过ANF可以实现对采样电压进行正序分量的提取^[12],在 $\alpha\beta$ 静止坐标中的ANF微分方程表达式如下:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{\alpha\beta} + \theta^2 x_{\alpha\beta} = 2\zeta\theta u_{\alpha\beta}, \\ \dot{\theta} = -\gamma x_{\alpha\beta} \theta u_{\alpha\beta}, \\ u_{\alpha\beta} = u_{\alpha\beta} - \dot{x}_{\alpha\beta}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: γ 、 ζ 均为ANF的参数; $x_{\alpha\beta}$ 为中间变量; θ 为电网频率的估计值。

图2为基于正序电压提取的逆变器控制框图。首先,对电网电压和逆变器的输出电流进行采样;再对采样信号进行 $abc/\alpha\beta$ 坐标变换,得到 $u_{\alpha\beta}$ 和 $i_{\alpha\beta}$; $u_{\alpha\beta}$ 经过频率检测单元模块后,得到ANF中所需参数值;然后,通过ANF对电网电压进行正序分量提取,将得到的 $u_{\alpha\beta}^+$ 和 P^* 、 Q^* 经过式(4)~(5)后即可得到参考电流的值 $i_{\alpha\beta}^*$,将 $i_{\alpha\beta}^*$ 与 $i_{\alpha\beta}$ 相减得到的电流误差值传递给比例谐振控制器;最后,通过调制策略得到所需SPWM,进而实现对不平衡电网电压下的光伏并网逆变器的控制。

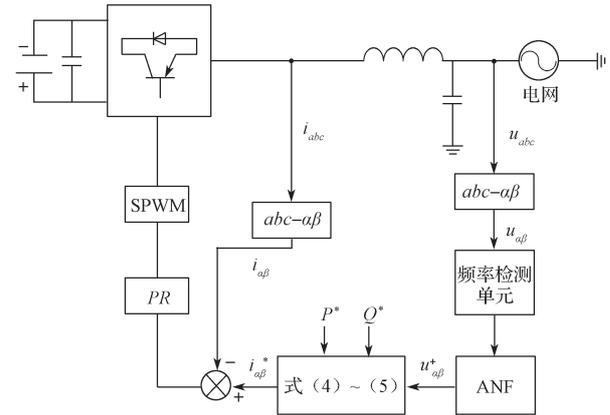


图2 基于正序电压提取的逆变器控制框图

Fig. 2 Inverter control block diagram based on positive sequence voltage extraction

4 仿真结果分析

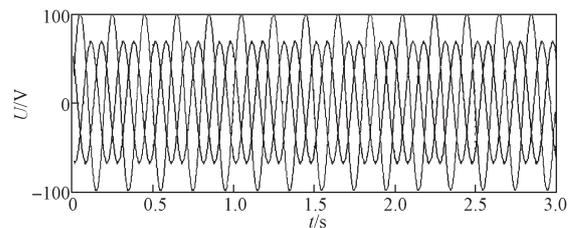
通过在Matlab/Simulink环境下搭建所提出控制策略的仿真模型,仿真试验参数如表1所示。

表1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of the simulation system

参数	取值	参数	取值
U_d	200 V	u_a	100~0 V
u_b	68.4~135 V	u_c	68.4~135 V
P	500 W	Q	400 Var
L	5 mH	C	10 μ F

本次仿真中电网电压的不平衡主要针对A相电压偏高的情况,图3为电网电压不平衡情况下电网电压和并网逆变器的输出功率波形。



a) 电网电压

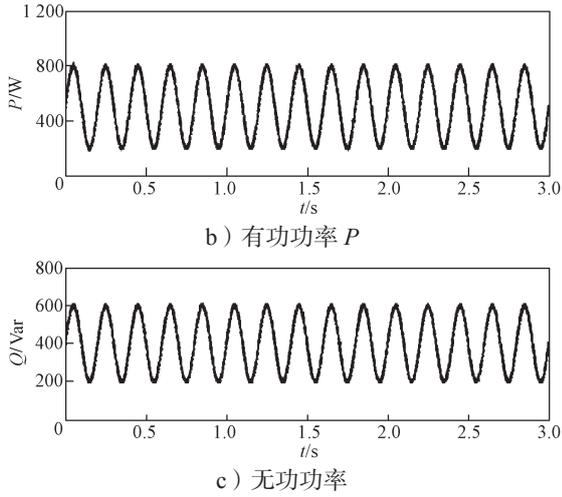


图3 电网电压不平衡时的仿真结果

Fig. 3 Results of unbalanced voltage in power grid

从图3所示电网电压不平衡时的仿真结果可知,此时光伏并网逆变器输出的有功功率和无功功率波动都较大,有功功率和无功功率的波动峰-峰值约为600 W和400 Var。

图4为基于正序电网电压下的功率波动平抑策略仿真结果。将图4的波形结果与图3中的进行对比,可以明显地看出,采用此控制策略后,逆变器的输出功率基本保持恒定。

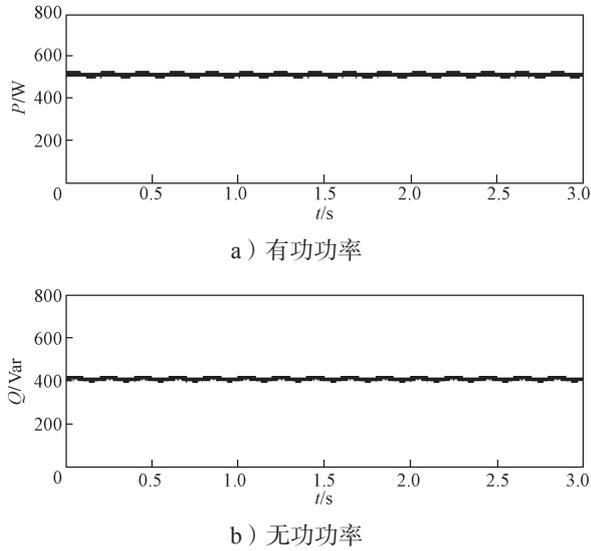


图4 基于正序电压控制下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results based on positive sequence voltage

实验中,光伏系统直流母线电压 U_{dc} 采用直流源Chroma62024P-80-60模拟,电网电压 u_g 不平衡情况采用Chroma6560可编程交流源进行模拟,系统控制算法采用32位浮点TMS320F28335DSP实现,模拟实验中的各元件参数与仿真中的元件参数基本一致,最后得到不平衡电网下逆变器输出 P 、 Q 实验波形,

如图5所示。

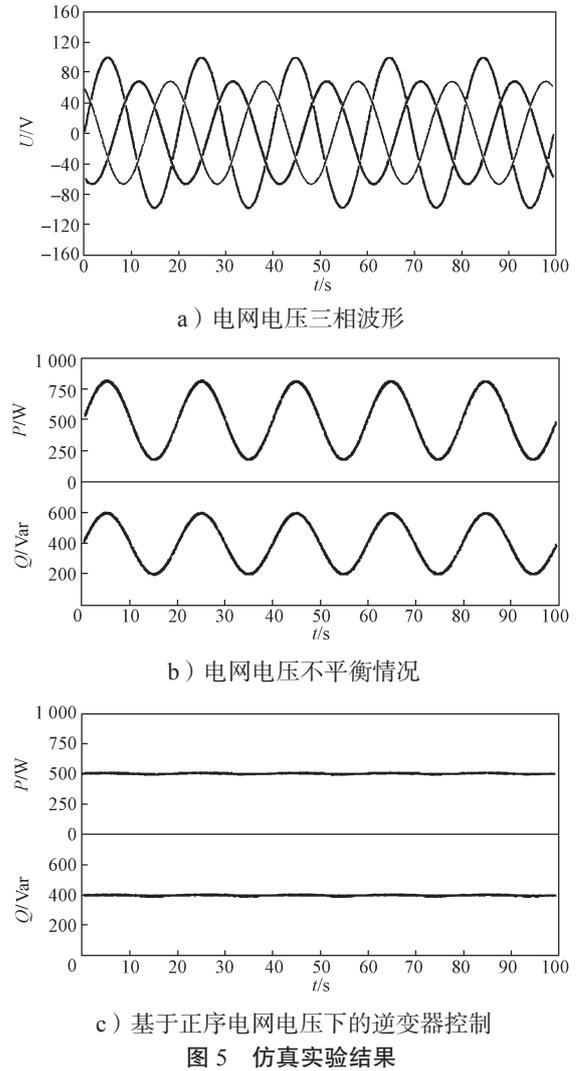


图5 仿真实验结果

Fig. 5 Simulation results

由图5b所示实验结果可知,当电网电压不平衡时,光伏并网逆变器输出的功率波动较大,且功率波动范围和仿真结果基本相同。图5c为基于正序电网电压下逆变器控制的实验结果,可见此时有功功率和无功功率波动均明显减小,可知该逆变器控制方法有效地改善了电网电压不平衡时光伏并网逆变器的输出电能质量。

5 结论

本文针对电网电压不平衡情况下并网逆变器的输出功率波动问题,提出了基于正序电压提取下的功率波动平抑策略。

1) 在不平衡电网电压下对电网电压采样后,利用ANF进行采样电压正序分量提取,并将所提取的正序电网电压作为控制系统所需的实际采样信号,可实现光伏并网逆变器输出功率波动的有效消除。

2) 理论分析和仿真实验结果均表明, 所提控制方法有效地解决了在不平衡电网电压下的光伏并网逆变器输出功率的有效控制, 有效地消除了功率波动, 实现了电网电压不平衡情况下光伏并网逆变器输出有功功率和无功功率的稳定。

参考文献:

- [1] XU Hailiang, HU Jiabing, HE Yikang. Integrated Modeling and Enhanced Control of DFIG Under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2012, 27(3): 725-736.
- [2] 伞国成, 漆汉宏, 魏艳君, 等. 基于复功率的电网电压不平衡条件下并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 229-236.
SAN Guocheng, QI Hanhong, WEI Yanjun, et al. Complex Power Based Control Strategy of Grid-Connected Inverter Under Unbalanced Grid Voltage Conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical, 2017, 32(8): 229-236.
- [3] 季林, 张晓蕊, 许津铭, 等. 非理想电网下三相LCL滤波并网逆变器对称电流控制[J]. 电源学报, 2016, 14(5): 47-53.
JI Lin, ZHANG Xiaorui, XU Jinming, et al. Symmetrical Current Control for Three-Phase Grid-Connected Inverters Under Non-Ideal Grid Conditions[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(5): 47-53.
- [4] HARNEFORS L, YEPES A G, VIDAL A, et al. Passivity-Based Controller Design of Grid-Connected VSCs for Prevention of Electrical Resonance Instability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 702-710.
- [5] 孙强, 魏克新, 王莎莎, 等. PWM变换器在矢量旋转坐标系下比例谐振控制策略及其鲁棒性设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1344-1356.
SUN Qiang, WEI Kexin, WANG Shasha, et al. A Novel Proportional Resonant Control Strategy and Robust Design in Rotary Vector Frames for PWM Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1344-1356.
- [6] REYES M, RODRIGUEZ P, VAZQUEZ S, et al. Enhanced Decoupled Double Synchronous Reference Frame Current Controller for Unbalanced Grid-Voltage Conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3934-3943.
- [7] 全宇, 年珩. 不平衡及谐波电网下并网逆变器的谐振滑模控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1345-1352.
QUAN Yu, NIAN Heng. Resonance-Based Sliding Mode Control of Grid Connected Inverters Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1345-1352.
- [8] 沈永波, 年珩. 不平衡及谐波电网下基于静止坐标系的并网逆变器直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 114-122.
SHEN Yongbo, NIAN Heng. Stationary Frame Direct Power Control of Grid-Connected Inverter Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 114-122.
- [9] 蔡文, 刘邦银, 段善旭, 等. 三相不对称条件下的电网阻抗检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 37-42.
CAI Wen, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. A Grid Impedance Detection Method Under Unbalanced Three-Phase Conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 37-42.
- [10] 张学广, 马彦, 李瑞, 等. 两相静止坐标系下并网逆变器的重复控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 85-91.
ZHANG Xueguang, MA Yan, LI Rui, et al. Repetitive Control Strategy for Grid-Connected Converters in Stationary Frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 85-91.
- [11] 郭小强, 张学, 卢志刚, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 346-353.
GUO Xiaoqiang, ZHANG Xue, LU Zhigang, et al. Coordinate Control of Power and Current Quality for Grid-Connected PV Inverters Under Unbalanced Grid Voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 346-353.
- [12] 刘力, 于佳丽. 不对称电网电压下光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2848-2855.
LIU Li, YU Jiali. Research on Control Strategy of Grid Connected PV Inverter Under Asymmetrical Grid Voltage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2848-2855.

(责任编辑: 廖友媛)