

Research on Photovoltaic Grid Connected Generation System with Harmonic Compensation

Qifeng Tong, Tianze Li*, Chunyu Shi

College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: fnedved@126.com, *ltzhang@163.com

Received: May 14th, 2016; accepted: Jun. 7th, 2016; published: Jun. 14th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to improve the power quality of grid connected photovoltaic system, a photovoltaic grid connected generation system with harmonic compensation function is proposed. The harmonic current of the network is improved by using the improved $i_p - i_q$ detection method, the detected harmonic compensation signal and the normal grid connected signal synthesis. Inverter control uses SVPWM control strategy to reduce switching losses. Matlab simulation results show that the system can effectively compensate the harmonic current in grid connected point when supporting power, verifying the feasibility of the proposed system structure and control strategy. The conclusion provides a reference for engineering application.

Keywords

Photovoltaic Grid Connected, Harmonic Compensation, Matlab Simulation

具有谐波补偿功能的光伏并网发电系统研究

仝其丰, 李田泽*, 史春玉

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博
Email: fnedved@126.com, *ltzhang@163.com

*通讯作者。

文章引用: 仝其丰, 李田泽, 史春玉. 具有谐波补偿功能的光伏并网发电系统研究[J]. 电力与能源进展, 2016, 4(3): 51-57. <http://dx.doi.org/10.12677/aepe.2016.43007>

收稿日期：2016年5月14日；录用日期：2016年6月7日；发布日期：2016年6月14日

摘要

为了在光伏并网发电的同时改善并网点的电能质量，提出了具有谐波补偿功能的光伏并网发电系统。对于并网点的谐波电流采用改进的 $i_p - i_q$ 检测方法，检测所得谐波补偿信号与正常的光伏发电并网信号合成，作用于逆变器实现光伏并网和谐波补偿。逆变器的控制采用SVPWM控制策略，以减少开关损耗。Matlab仿真结果表明该系统在并网发电的同时可有效补偿并网点谐波电流，验证了所提系统结构和控制策略的可行性，该结论为工程应用提供了参考。

关键词

光伏并网，谐波补偿，Matlab仿真

1. 引言

太阳能因其清洁环保，取之不竭的优势成为近年来新能源发电的研究热点。光伏并网发电技术在我国得到了深入研究，目前已进入大规模推广应用阶段。但目前光伏发电系统主要在有光照下工作，无光照时退出运行，设备利用率不高，并且频繁的投切会影响电网稳定[1]。在治理电网谐波方面有源滤波器(APF)效果明显，但成本较高限制了应用。对比分析发现，并网逆变器和 APF 具有相似的拓扑结构，由此本文提出了一种具有 APF 的谐波补偿功能的光伏并网发电系统，不但能实现并网发电，还可以补偿负载谐波。

2. 光伏并网系统结构

电力系统中使用有源滤波器(APF)进行无功补偿、谐波抑制和平衡三相电流来解决电能质量问题。APF 拓扑结构中直流侧稳定电压是无功补偿和谐波抑制的关键，通常其直流侧接一电容，经过吸收来自电网的有功功率维持电容储能。APF 的直流侧基本控制方式为，当直流侧的电压值超过给定时，APF 向所接电网注入有功电能以减小直流侧两端电压。也就是经过控制上的改变可以实现把 APF 直流侧电能以有功的形式注入电网，与光伏并网系统将有功电能注入电网一样，这是光伏并网发电系统实现 APF 谐波补偿功能的理论基础。在拓扑结构上逆变器与 APF 也基本一致，光伏并网系统结构图如图 1 所示。系统结构主要有光伏电池阵列、MPPT 控制组件、变流器、LC 滤波器以及信号采集与控制单元[2]-[4]。

图 1 中光伏阵列经过 boost 电路接到逆变器直流侧，经过对光伏阵列实施最大功率点跟踪(MPPT)得到稳定的工作电压，满足最大并网功率。在 MPPT 调节控制中得到并网的有功信号指令，另一方面在并网点提取非线性负载所产生谐波的补偿信号，两路指令信号最终经过信号合成得到并网控制信号，从而控制逆变器驱动，既实现向电网输入有功电能又能补偿谐波电流。这样可以在光伏并网系统同时实现并网发电和谐波电流补偿，拓展了设备性能。

3. 谐波检测和指令信号合成

3.1. 基于瞬时无功功率的谐波检测方法

并网点谐波电流的检测是实现谐波补偿的关键，为了保证对电网谐波补偿质量，系统必须可以实现对谐波电流的快速检测。目前基于瞬时无功功率理论的检测方法因其快速、高效的特点而广泛应用。主

要分为 dq 坐标变换法、p-q 法和 $i_p - i_q$ 法，这三种方法都可以比较准确的检测出谐波分量，考虑到光伏并网发电系统一般存在电压波形畸变问题，故在此处采用不易受电源电压波形畸变影响的 $i_p - i_q$ 法[5] [6]。

图 2 为基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 谐波检测原理框图，工作原理为：电流 i_a, i_b, i_c 分别是并网点负载电流，经过 C_{32} 变换矩阵由三相静止坐标系变成 $\alpha-\beta$ 正交两相静止坐标系，之后 $\alpha-\beta$ 正交两相静止坐标系通过 C 变换矩阵变成 p-q 旋转坐标系，在 p-q 旋转坐标系中 p 轴和 q 轴各自是电网电压矢量 u_a 和 u_a 的法线，矩阵 C^{-1} 和 C_{23} 分别是矩阵 C_{32} 和 C 的逆变换阵，LPF 是低通滤波器。

其中：

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}, \quad \omega \text{--- 电网角频率}; \quad C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

三相电流 i_a, i_b, i_c 经过矩阵 C_{32} 和 C 变换后得到的分别是 p-q 旋转坐标系之下的有功电流分量 i_p 和无功电流分量 i_q ，当 i_a, i_b, i_c 中没有高次谐波电流时， i_p 和 i_q 都是直流量，当 i_a, i_b, i_c 中有高次谐波时， i_p 和 i_q 中具有脉动的高次谐波，经过低通滤波器 LPF 可以得到 p-q 旋转坐标系下的基波有功直流量 \bar{i}_p 和基波无

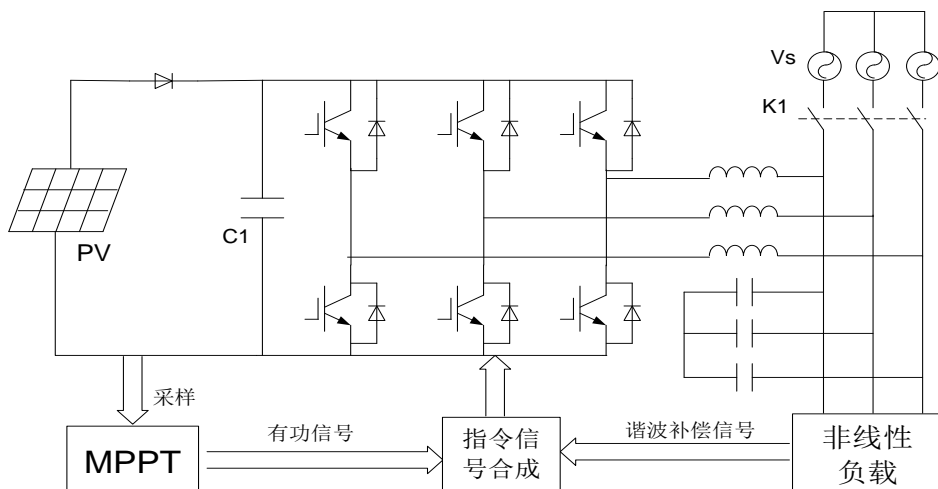


Figure 1. The structure of photovoltaic grid connected system with the function of harmonic compensation

图 1. 具有谐波补偿功能光伏并网系统结构图

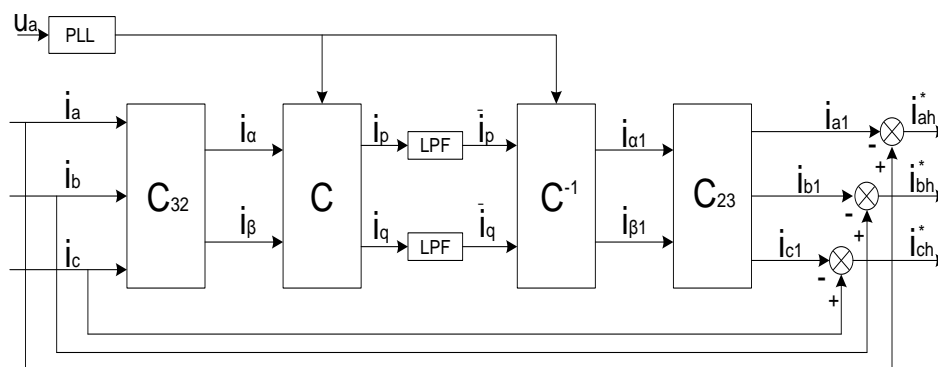


Figure 2. Schematic diagram of harmonic detection based on instantaneous reactive power theory

图 2. 基于瞬时无功功率理论的谐波检测原理框图

功直流分量 \bar{i}_q , 再经过逆矩阵 C^{-1} 和 C_{23} 逆变换, 便可以得到被检测的电网电流 i_a, i_b, i_c 中实际基波电流分量 i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} , 经过计算可以得到并网点谐波电流 $i_{ah}^*, i_{bh}^*, i_{ch}^*$, 即

$$\begin{pmatrix} i_{ah}^* & i_{bh}^* & i_{ch}^* \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} i_a & i_b & i_c \end{pmatrix}^T - \begin{pmatrix} i_{a1} & i_{b1} & i_{c1} \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

上述基于瞬时无功率理论的谐波检测原理对于低通滤波器(LPF)要求较高, LPF 性能好坏直接影响谐波检测效果[7]。此处考虑系统快速反应要求和滤波质量, 设计选择参数少的二阶 Butterworth 低通数字滤波器, 采样频率 f_s 设计为 5 kHz, 其系统函数对应的算法方程为:

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + b_2x(n-2) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2) \quad (2)$$

其中, $y(n)$ ——滤波器第 n 次输出, $y(n-1)$ ——滤波器第 $n-1$ 次输出, $y(n-2)$ ——滤波器第 $n-2$ 次输出; $x(n)$ ——滤波器第 n 次采样, $x(n-1)$ ——滤波器第 $n-1$ 次采样, $x(n-2)$ ——滤波器第 $n-2$ 次采样; a_1, a_2, b_0, b_1, b_2 为滤波器系数。

3.2. 有功并网信号和谐波指令信号合成

前面检测出并网点谐波后, 形成谐波指令信号, 该信号与来自 MPPT 的有功指令信号合成, 共同产生并网信号, 控制光伏系统以实现有功并网和谐波电流补偿。合成方法采用直接合成法[8]-[10]。图 1 中经过 MPPT 控制得到有功指令信号设为 i_{p0} , 图 2 中三相电流 i_a, i_b, i_c 经过矩阵 C_{32} 和 C 变换和 LPF 后得到基波有功直流分量 \bar{i}_p , 二者合成算法如下:

$$\begin{pmatrix} i_{a1}(t) \\ i_{b1}(t) \\ i_{c1}(t) \end{pmatrix} = C_{23}C^{-1} \begin{pmatrix} \bar{i}_p - i_{p0} \\ 0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \left[\omega t - \frac{2\pi}{3} \right] \\ \sin \left[\omega t + \frac{2\pi}{3} \right] \end{pmatrix} (\bar{i}_p - i_{p0}) \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} i_{ah}^*(t) \\ i_{bh}^*(t) \\ i_{ch}^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{a1}(t) \\ i_{b1}(t) \\ i_{c1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a(t) - \sqrt{\frac{2}{3}}\bar{i}_p \sin \omega t \\ i_b(t) - \sqrt{\frac{2}{3}}\bar{i}_p \sin \left[\omega t - \frac{2\pi}{3} \right] \\ i_c(t) - \sqrt{\frac{2}{3}}\bar{i}_p \sin \left[\omega t + \frac{2\pi}{3} \right] \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} i_{p0} \sin \omega t \\ i_{p0} \sin \left[\omega t - \frac{2}{3}\pi \right] \\ i_{p0} \sin \left[\omega t + \frac{2}{3}\pi \right] \end{pmatrix} \quad (4)$$

4. 逆变器控制策略

控制系统采用电流跟踪控制模式, 在检测模块给出谐波补偿信号后, 与 MPPT 计算出的有功并网信号共同形成指令信号, 指令合成信号控制变流器, 产生与电网中谐波电流大小相等极性相反的谐波电流, 从而补偿掉电网谐波, 改善电能质量[11]。SVPWM 控制实时性好, 动态响应能力强, 对于开关损耗可以明显降低, 故对变流器的控制此处采用 SVPWM 控制策略。

图 3 为逆变器拓扑结构图。图中 U_a, U_b, U_c 是作为逆变器时输出的三相电压, U_{dc} 表示直流侧母线电压, 使用 a, b, c 表示每个桥臂开关状态: 0 表示上桥臂关闭, 下桥臂导通; 1 表示与 0 相反。输出的电压表达式为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

将上式三相坐标系的 U_a, U_b, U_c 经矩阵变换到两相坐标系中的 U_α, U_β ，表达式如下：

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

SVPWM 控制方式下的开关方式可以获得 8 种 $[a \ b \ c]^T$ 组合方式，把 8 种开关组合带入表达式(5)和(6)便得到并网侧输出的相电压开关组合和空间矢量之间的组合，二者关系见表 1。复平面中每一个空间矢量的幅值为直流侧母线电压 U_{dc} 的 $2/3$ 。

根据 $[a \ b \ c]^T$ 的 8 种不同开关组合(000)—(111)，可以得出 8 个空间矢量，在 $\alpha\beta$ 平面上分出 6 个扇形平面，如图 4 所示。

5. MATLAB/Simulink 仿真实验

根据光伏并网系统结构图，在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型，验证前面的控制策略。验证的工作模式为有一定的光照强度，光伏阵列输出有功功率，并网系统进行并网发电，并且实现谐波补偿。主

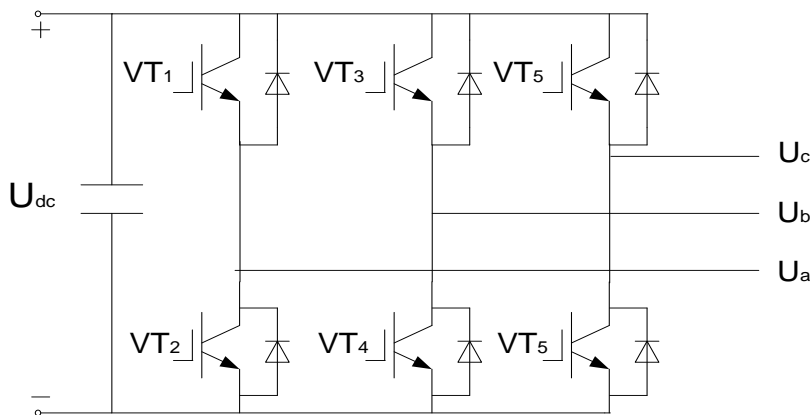


Figure 3. Inverter topology
图 3. 逆变器拓扑结构图

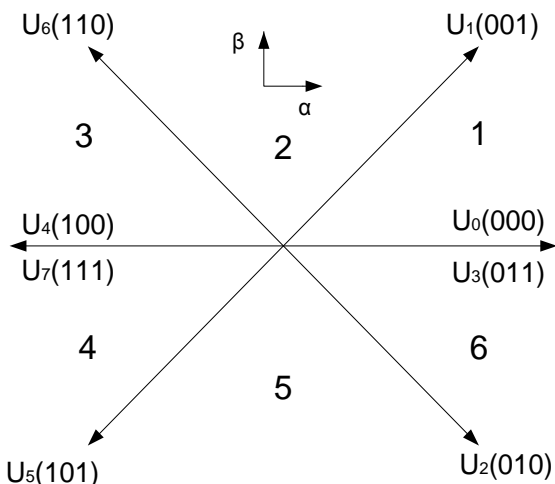


Figure 4. Voltage space vector diagram
图 4. 电压空间矢量图

要参数为：25℃常温，光照强度 1000 W/m²，光伏阵列最大直流侧输出电压 700 V，变流器的输出每相电压 220 V，滤波电感 3 mH，滤波电容 100 μF，开关频率 10 kHz。

图 5 是实验得到的 A 相电网电压电流和 A 相负载电流波形。在 0.06 s 之前控制光伏系统只进行光伏发电，受非线性负载影响在电网中存在大量谐波电流，在 0.06 s 后光伏系统在有功并网的同时实现谐波补偿，电网电流波形有了明显改善。图 6 为并网电流的 FFT 谐波分析图，电流谐波总畸变量由补偿前的 20.1% 下降到补偿后的 3.2%，说明系统能够实现光伏发电并网的同时补偿并网点谐波，验证了控制策略的有效性。

6. 结论

本文提出的光伏并网系统采用改进的 $i_p - i_q$ 法检测出电网谐波，之后与并网有功指令信号合成，最后

Table 1. Switch combination and space vector relationship

表 1. 开关组合和空间矢量关系

a	b	c	U_a	U_b	U_c	U_α	U_β
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	$-\sqrt{3}/3$
0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1/3	$\sqrt{3}/3$
0	1	1	-2/3	-1/3	1/3	-2/3	0
1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	2/3	0
1	0	1	1/3	-2/3	1/3	$\sqrt{3}/3$	$-\sqrt{3}/3$
1	1	0	1/3	1/3	-2/3	1/3	$\sqrt{3}/3$
1	1	1	0	0	0	0	0

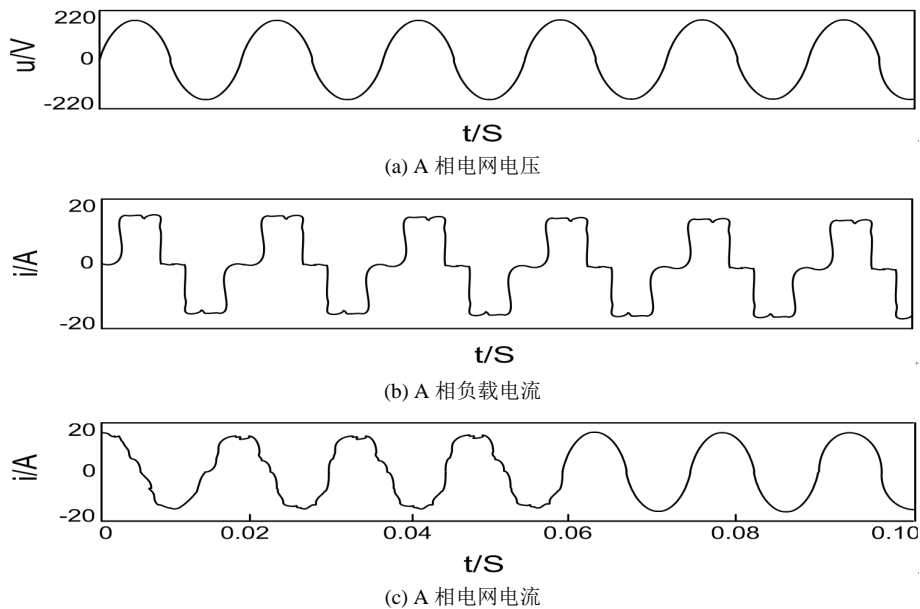


Figure 5. Results of Matlab simulation

图 5. Matlab 仿真结果

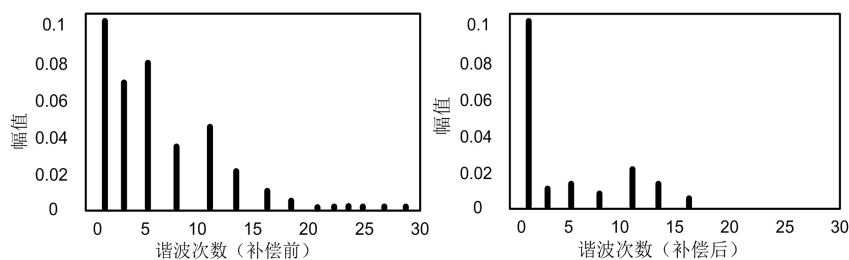


Figure 6. FFT analysis of harmonic compensation
图 6. 谐波补偿前后 FFT 分析图

实现谐波补偿和有功并网。对于逆变器的控制采用空间适量电压法，可有效减少开关损耗。仿真验证表明该系统在实现光伏发电并网的同时，对电网谐波有明显改善作用，有效地提高了并网设备利用率。

基金项目

山东省高等学校科技计划：项目编号：J15LN31。

参考文献 (References)

- [1] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
- [2] 陈高华, 邓华. 光伏发电并网系统建模与仿真[J]. 大功率变流技术, 2014(5): 36-40.
- [3] Mastromauro, R.A., Liserre, M., Kerekes, T., et al. (2009) A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System with Power Quality Conditioner Functionality. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, **56**, 4436-4444. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2004383>
- [4] 顾建军, 徐殿国, 刘汉奎, 等. 有源滤波技术现状及其发展[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 126-132.
- [5] 刘继权, 张茂松. 基于瞬时无功功率理论的新型谐波检测法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(10): 29-32.
- [6] Cagnano, A., De Tuglie, E., Liserre, M., et al. (2010) On-Line Optimal Reactive Power Control Strategy of PV-Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **99**, 1-10.
- [7] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61-66.
- [8] 杜春水, 张承慧, 刘鑫正, 等. 带有源电力滤波功能的三相光伏并网发电系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 163-169.
- [9] 汪海宁, 苏建徽, 丁明. 光伏并网功率调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 75-79.
- [10] 张俊敏, 田微. 基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 33-36.
- [11] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.