

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.6.10

## 两种负载模式下光伏并网系统无功控制

陈拉拉, 王蔚\*

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 基于两相旋转坐标,通过对并网逆变器有功功率和无功功率单独控制,实现光伏系统并网发电和本地负载无功补偿一体化运行。Simulink验证了光伏系统输出满足本地负载后余电并网和电网向负载供电两种模式下的要求。

**关键词:**  $dq$  电流解耦; 无功补偿; Simulink

**中图分类号:** TM 714.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-1374(2017)06-0573-06

## Reactive power control of PV grid system under two load modes

CHEN Lala, WANG Wei\*

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Based on two phase rotating coordinates, the active power and reactive power of grid inverter are controlled differently to realize the integration of photovoltaic (PV) grid-connected power generation and local load reactive power compensation. Simulink experiments indicate that the PV system can meet the needs of both the local load and the grid power generation.

**Key words:**  $dq$  current decoupling; reactive power compensation; Simulink.

### 0 引言

我国电厂目前主要以火力发电为主,水能、核能和其他新能源发电为辅,众所周知,火力发电需要燃煤,一方面,煤炭资源作为不可再生资源,在不久将来面临枯竭;另一方面,燃煤排出的废气会对环境造成严重的破坏。太阳能作为清洁能源,待开发的能量巨大<sup>[1]</sup>,取之不尽,对新能源的开发

逐渐受到各国家的关心<sup>[2-4]</sup>,在不远的将来,新能源将会是人类的主要能源。上个世纪80年代<sup>[5]</sup>,光伏并网发电逐步市场化,近年来,中国响应全球节能减排号召,大力推行光伏产业发展,光伏装机量和技术研发力度在逐年提高。

目前大多数设备不仅消耗有功功率,还消耗无功功率,如果光伏并网系统在并网发电的同时,还可以对本地负载进行无功补偿,这样就可以减

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204031GX)

作者简介: 陈拉拉(1994-),男,汉族,江苏徐州人,长春工业大学硕士研究生,主要从事电力变换技术与新能源开发方向研究, E-mail: 1031390578@qq.com. \* 通讯作者: 王蔚(1976-),男,汉族,吉林长春人,长春工业大学副教授,硕士,主要从事电力变换与新能源开发方向研究, E-mail: wangwei@ccut.edu.cn.

轻电网的负担,提高电网稳定性。并网逆变器拓扑多为电压型结构,与静止无功补偿器有相似之处<sup>[6]</sup>,因此,可通过对逆变器的控制,使其既可以并网发电,也兼备无功补偿的功能。

## 1 系统控制原理

系统拓扑为三相桥式电压型逆变器,滤波器为一阶 L 滤波器,输出接本地负载和电网,有功电流给定值  $i_d^*$  由系统的直流侧环节产生,具体过程是给定直流侧电压  $V_{dc}^*$  和实际直流侧电压  $V_{dc}$  比较,其误差经过电压调节器来生成  $i_d^*$ ,通过坐标变换提取负载电流无功分量,作为系统无功调节给定值  $i_q^*$ ,通过三相自然坐标系到两相旋转坐标变换,将获取的并网电流  $i_d, i_q$  和  $i_d^*, i_q^*$  比较,两者误差送进电流调节器,再通过解耦控制(第二小节推导)和坐标变换,经 PWM 模块产生驱动信号来控制逆变器,使系统兼备有功并网和负载无功补偿的功能。对于 PWM 调节器的选择,有的学者采用 SPWM<sup>[7-8]</sup>,而 SVPWM 的特点是直流侧  $V_{dc}$  的利用率相比 SPWM 要高,而且功率器件(MOS 管或 IGBT)导通关断次数减少,功率损耗低,故采用 SVPWM 调制方式。

## 2 dq 坐标系下的电流解耦

大容量逆变器多是三相三线制,环路设计时,可将系统从三相自然坐标转换到两相静止坐标下,此时,三相逆变器可转为两个单相逆变器控制;也可转换到两相旋转坐标系下<sup>[10]</sup>,此时可直接控制逆变器有功电流和无功电流,方便逆变器有功功率和无功功率调节,采用 PI 调节可实现并网电流基波无静差控制,故采用 dq 坐标系。

dq 坐标下三相并网逆变器的数学模型如下:

$$\begin{cases} e_d = u_d - i_d R - L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q \\ e_q = u_q - i_q R - L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d \end{cases} \quad (1)$$

可见 d 轴中存在  $i_q$ ,而 q 轴中存在  $i_d$ ,即两者耦合,这会加大设计电流调节器难度,因此要对两者解耦,把式(1)变形为:

$$\begin{cases} i_d R + L \frac{di_d}{dt} = u_d + \omega L i_q - e_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} = u_q - \omega L i_d - e_q \end{cases} \quad (2)$$

令

$$\begin{cases} u'_d = u_d + \omega L i_q - e_d \\ u'_q = u_q - \omega L i_d - e_q \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2):

$$\begin{cases} i_d R + L \frac{di_d}{dt} = u'_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} = u'_q \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可看出,把  $u'_d$  和  $u'_q$  作为等效电流变量时,d 轴与 q 轴实现了独立控制, $u'_d$  与  $u'_q$  由电流环 PI 控制器产生,即:

$$\begin{cases} u'_d = \Delta u_d = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_d^* - i_d) \\ u'_q = \Delta u_q = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta u_d, \Delta u_q$  —— PI 调节器 d 轴和 q 轴分量的输出;

$\tau_{pi}$  —— 积分时间常数;

$i_d^*, i_q^*$  —— d 轴与 q 轴电流给定值。

可得控制变量  $u_d$  和  $u_q$  的控制方程为:

$$\begin{cases} u_d = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_q = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (6)$$

通过推导,借助引入电流状态反馈,解除 dq 耦合,可独立控制,简化环路设计。Simulink 模块库搭建的仿真图如图 1 所示。

## 3 两种负载模式下仿真

通过 Simulink 模块库搭建光伏并网系统模型,光伏系统容量 100 KVA,网侧电压 220 V,频率 50 Hz。

光伏阵列输出电压 370 V,经 Boost 电路升压至 700 V 供逆变器桥;滤波电感  $L = 3 \text{ mH}$ ,  $R = 0.01 \Omega$ ;调制方式为 SVPWM<sup>[11]</sup>。

光伏并网系统模型搭建如图 2 所示。

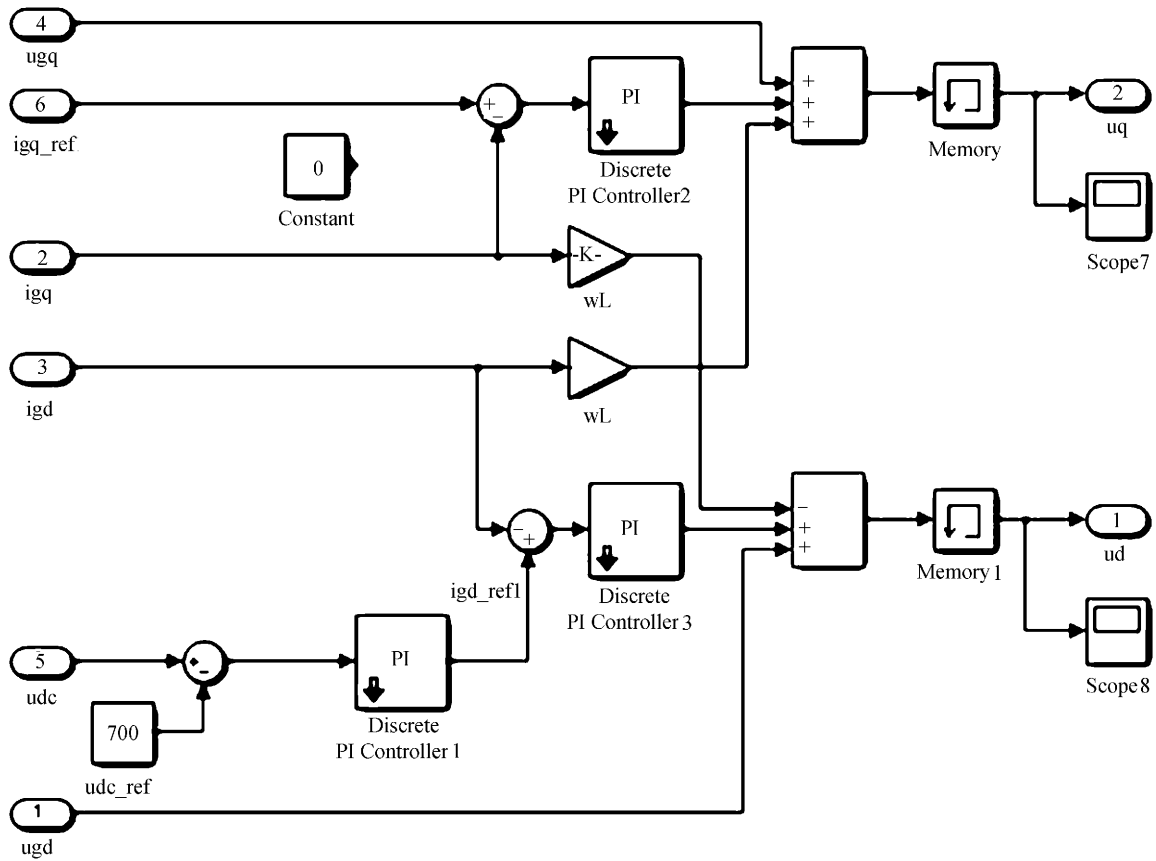


图 1  $d_q$  解耦控制仿真搭建

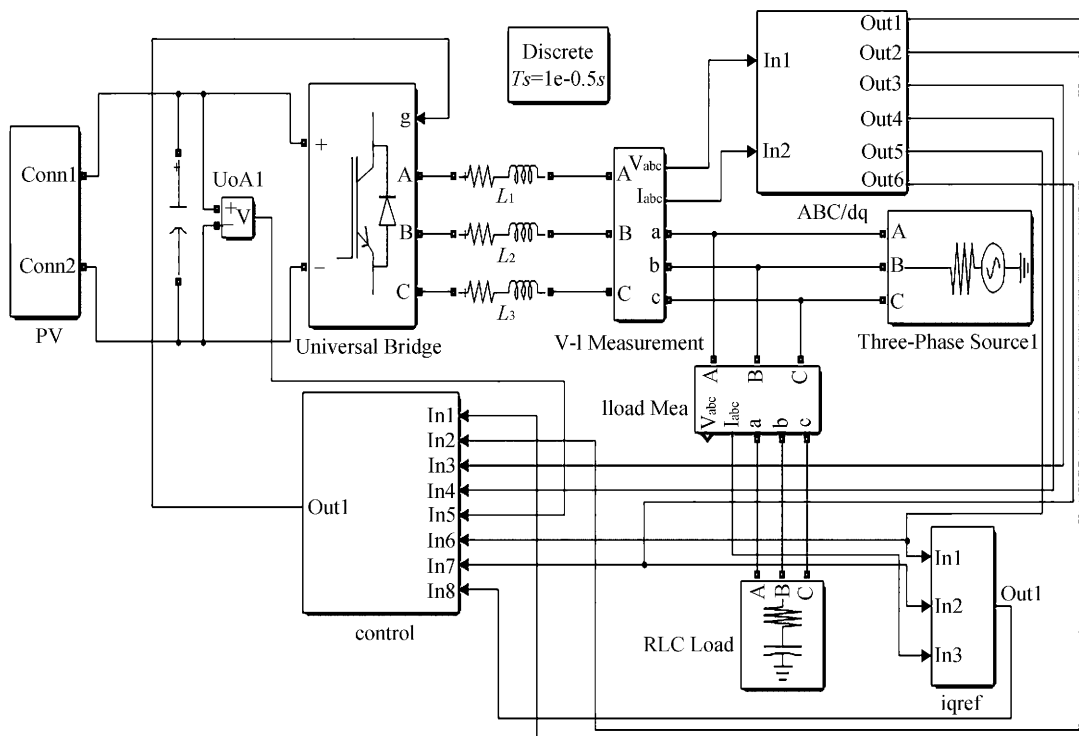


图 2 光伏并网系统模型搭建

### 3.1 光伏系统输出满足本地负载后余电并网

本地负载的阻性功率 50 kW, 感性功率 10 kvar。当系统以单位功率因数并网, 即  $i_q^*$  为 0, 那么系统不对负载进行无功补偿, 则负载所需无功由电网侧提供, 网侧电压和并网电流存在相

位差, 如图 3 所示。

当系统并网发电和负载无功补偿同时进行时如图 4 所示, 即  $i_q^*$  不为 0, 那么负载无功由系统供给, 电网无需向负载送无功, 其电压和并网电流如图 5 所示。

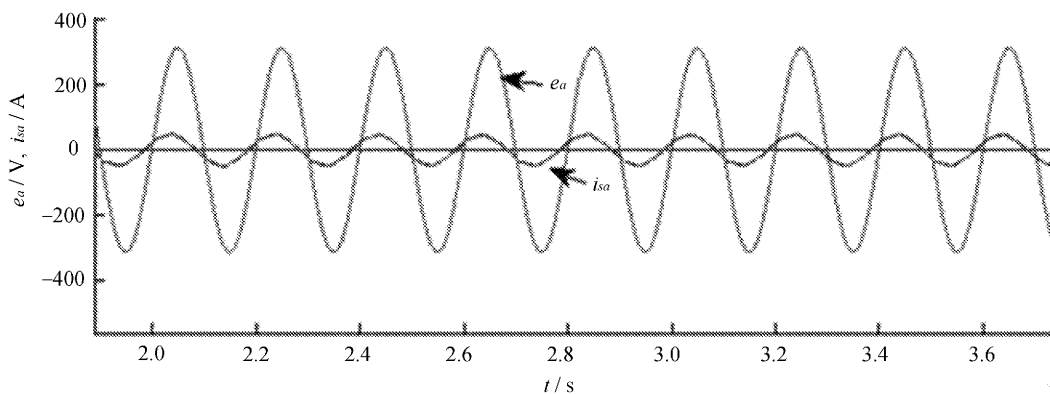


图 3 A 相电网电压和并网电流波形(未补偿)

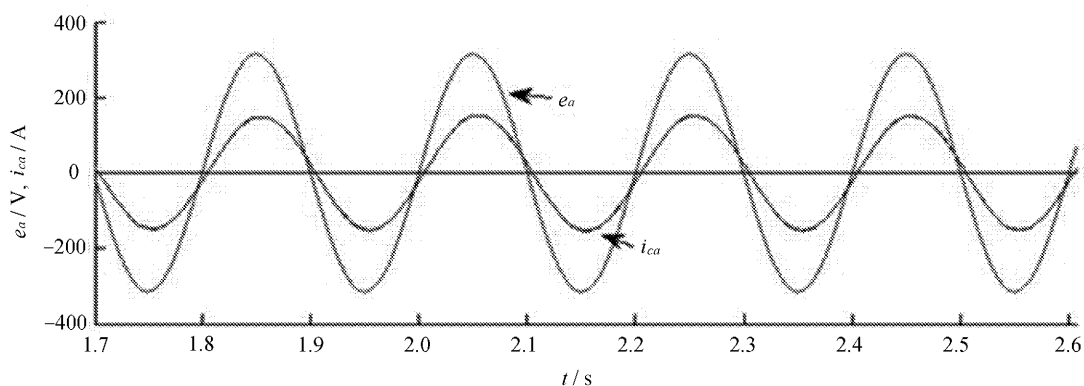


图 4 逆变器 A 相输出电压和电流波形(补偿后)

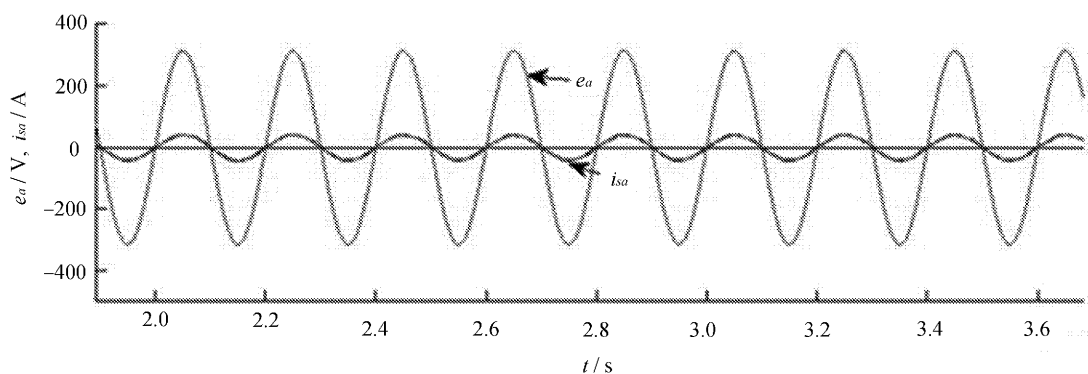


图 5 A 相电网电压和并网电流波形(补偿后)

从图 3~图 5 可以看出, 当系统以单位功率因数运行, 系统向负载和电网送有功, 而负载所需无功则由电网供给(见图 3); 当系统并网发电和本地负载无功补偿同时进行(见图 4), 网侧电

压和并网电流同相位(见图 5), 电网从系统吸收有功, 负载有功和无功从光伏系统获得, 系统多余有功馈送到电网。

### 3.2 电网向负载供电

增大本地负载阻性功率为 100 kW, 感性功率 15 kvar。此时, 系统输出有功功率不能满足负载需求, 则不足的功率由电网向负载输送。当系统以单位功率因数并网, 即  $i_q^*$  为 0, 那么系统不对负载进行无功补偿, 则负载所需无功由电网提供,

网侧电压和并网电流不完全反向且存在相位差, 如图 6 所示。

当系统并网发电和负载无功补偿同时进行如图 7 所示, 即  $i_q^*$  不为 0, 那么电网只向负载送有功而不向负载送无功, 其电压和并网电流如图 8 所示。

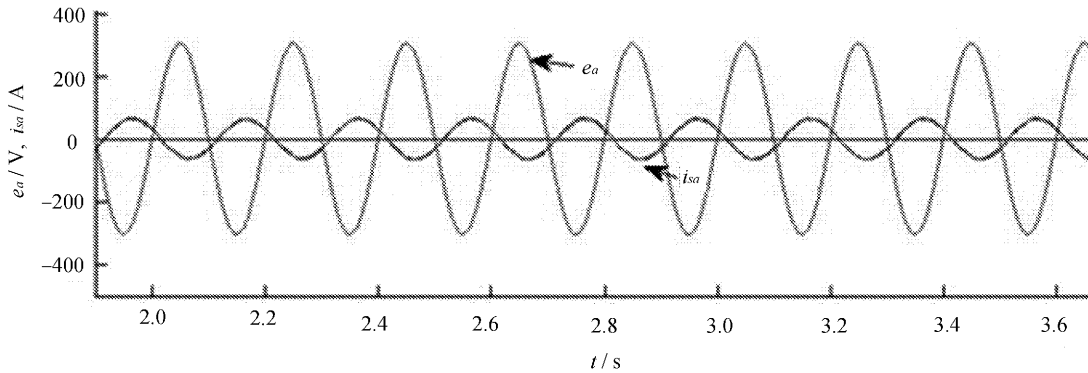


图 6 A 相电网电压和并网电流波形(未补偿)

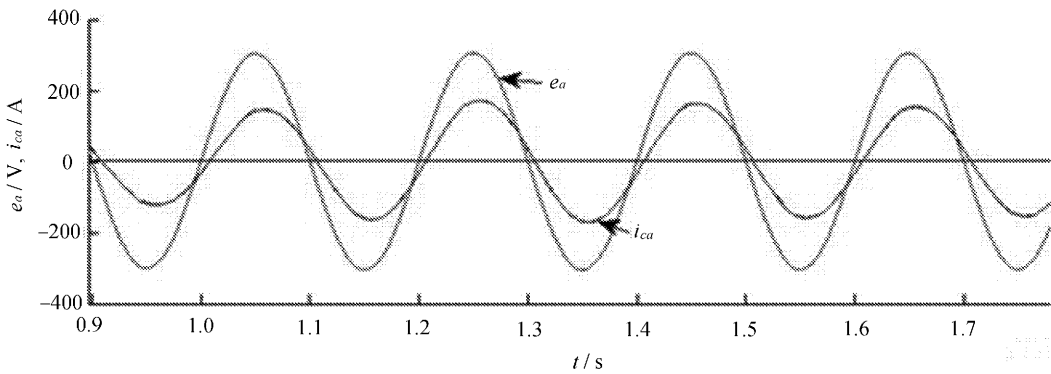


图 7 逆变器 A 相输出电压和电流波形(补偿后)

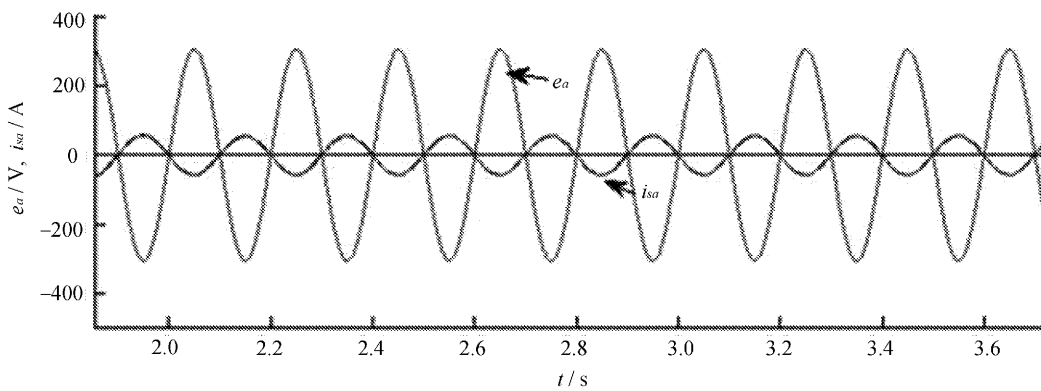


图 8 A 相电网电压和并网电流波形(补偿后)

由图 6~图 8 可知, 由于本地负载增大, 系统输出已不能满足负载需求, 当系统单位功率因数

运行时, 系统全部向负载提供有功, 而余下不足有功和全部无功由电网供给(见图 6), 此时电网

向负载既送有功也送无功;当系统并网发电和本地负载无功补偿同时进行(见图 7),系统向负载提供部分有功和全部无功,余下有功由电网向负载供给(见图 8),电网电压和电流完全反相,电网只向负载送有功。

#### 4 结 语

在  $dq$  两相旋转坐标下,通过分别控制逆变器有功和无功电流分量,实现逆变器有功功率和无功功率调节,使系统并网发电的同时兼备对本地负载无功补偿的功能,减轻网侧输电线路的有功损耗,增加电网的稳定性。最后借助 Simulink 元件库搭建仿真模型,验证系统在两种工作模式下,均可较好实现并网发电和对本地负载的无功补偿。

#### 参考文献:

- [1] 张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等.可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- [3] Zhengming Zhao, Lu Yin, Xiaoying Sun, et al. Recent development of technology and market of grid connected PV system in China[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2010:1-6.
- [4] 许洪华.中国光伏发电技术发展研究[J].电网技术,2007,31(20):77-81.
- [5] Oman H. Space solar power development[J]. IEEE AES Systems Magazine,2000,152:3-8.
- [6] 王晓,罗安,邓才波,等.基于光伏并网的电能质量控制系统[J].电网技术,2012,36(4):68-73.
- [7] Wang Haining, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Unitive control of PV grid connected generation and reactive compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(9):114-118.
- [8] 汪海宁,苏建徽,丁明,等.光伏并网功率调节系统[J].中国电机工程学报,2007,27(2):75-79.
- [9] Wang Haining, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Study on PV grid connected power conditioner with reactive power compensation and harmonic restrain[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2006,27(6):540-544.
- [10] 阮新波,王学华.LCL型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [11] 郁琰.基于 SVPWM 的交流调速系统仿真[J].长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(6):667-671.