

光伏水泵提水系统功率补偿器设计^{*}

徐 斌¹, 王志新¹, 包龙新², 秦 华³

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 上海禧龙科技股份有限公司, 上海 201517;
3. 上海华程电梯技术有限公司, 上海 201111)

摘 要: 光伏水泵提水系统是一种环保、可持续的新能源提水系统。但是光伏阵列的输出功率既不稳定又不连续, 难以实现 24 h 连续高效运行。由此提出了一种光伏-市电联合供电的提水系统, 通过功率补偿器进行协调控制, 亦即在光伏出力不足时, 自动接入市电进行功率缺额补偿。针对已有的系统为单级电路的特点, 分析了现有的功率补偿器方案的局限。提出了一种三相市电经过整流电路后直连直流母线的功率补偿器设计方案; 根据设计方案, 在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了相应的仿真模型并进行仿真验证; 最后, 通过试验对功率补偿器的功能、效率等进行了测试, 试验结果验证了设计方案的可行性。

关键词: 光伏-市电; 功率补偿; 单级电路

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)04-0067-06

Power Compensation Controller for Photovoltaic Water Pump System^{*}

XU Bin¹, WANG Zhixin¹, BAO Longxin², QIN Hua³

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Xilong Technology Co., Ltd., Shanghai 201517, China;
3. Shanghai Huacheng Elevator Co., Ltd., Shanghai 201111, China)

Abstract: Photovoltaic water pump system was a kind of environmental and sustainable new energy water pump system. Because the output power of PV array was unstable and discontinuous, it was hard to realize the 24-hour continuous and efficient running. So a PV-grid water pump system was put forward. When the output power of PV array was insufficient, the grid compensates for the power shortage automatically through the power compensation controller. For the characteristics of the existing system was single-stage circuit, the limitation of the existing power compensation controller scheme was analyzed. And a new design was proposed, in which the three-phase grid was directly connected to the DC bus after rectifier circuit. According to the design, the corresponding simulation model was built in the MATLAB/Simulink to verified the design. Then the function and efficiency of the power compensation controller were tested in experiment. The results of the experiments verified the feasibility of the design.

Key words: PV-grid; power compensation; single-stage circuit

0 引 言

光伏水泵提水系统是一种以太阳能作为能源的新能源提水系统。由于不需要电网供电或者内燃机驱动, 十分适合干旱缺水地区以及缺电无电

地区, 如我国西北地区、云南高原地区^[1-2]。此外, 西亚、中东、北非等地区也因为干旱少雨、太阳能资源丰富, 可以使光伏水泵提水系统发挥出最大的作用。另外, 像电网不可靠但以农业为主、灌溉需求大的印度农村地区, 也非常适合

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51377105); 上海市联盟计划(LM201702)

作者简介: 徐 斌(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源和电力电子等。

王志新(1964—), 男, 博士生导师, 研究方向为风力发电、光伏发电控制技术、柔性直流输电技术等。

包龙新(1968—), 男, 研究方向为风力发电技术等。

光伏水泵提水系统的应用。

尽管光伏水泵提水系统具有资源充足、低碳环保、建设成本低、易于维护等优点,但是由于太阳能资源的不可控制性及不可预测性,光伏水泵提水系统难以长时间连续高效的运行。即便采用带蓄电池的交流光伏水泵提水系统,由于蓄电池价格昂贵、寿命短、安装在室外还需要考虑蓄电池的防护问题以及为了使蓄电池有电可充,需要改变光伏阵列和水泵的功率配比而增加光伏阵列投资等问题,注定使得带蓄电池的交流光伏水泵提水系统难以得到广泛应用。因此,为了实现光伏水泵提水系统 24 h 连续高效运行,使用三相市电代替蓄电池,形成光伏-市电联合供电的提水系统。由于三相市电经过整流后的平均电压超过 500 V,远高于直流光伏水泵提水系统常用的 24、48 V 输出电压,因此只适合交流光伏水泵提水系统^[3]。

1 现有功率补偿设计方案的局限

文献[4]提出了一种针对一般负载的功率补偿设计方案,使用单相市电进行功率补偿,负载可为交流负载或直流负载,光伏-市电联合供电原理图如图 1 所示。

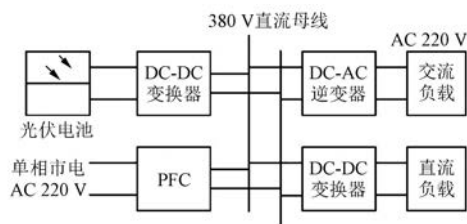


图 1 光伏-市电联合供电原理图

文献[5]提出了一种针对交流负载的功率补偿设计方案,使用单相市电进行功率补偿,功率平衡方案结构图如图 2 所示。

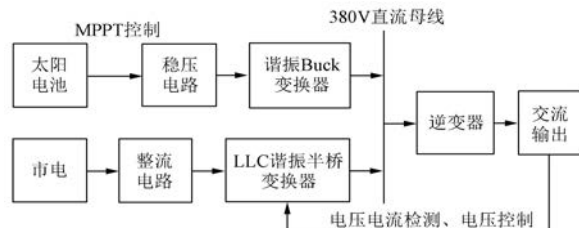


图 2 功率平衡方案结构图

由图 1、图 2 可以看出,现有的功率补偿控制器设计一般采用两级结构。对于交流负载,第一

级为直流变压模块,第二级为逆变模块,通过 380 V 直流母线相连。即使去掉功率补偿模块,即图 1 中的 PFC、图 2 中的整流电路以及 LLC 谐振半桥变换器,第一级中连接光伏电池的 DC-DC 电路仍然存在,总体仍为两级结构。文献[4-5]提出的功率补偿设计方案只适用于前端电路为两级结构的负载。但是由于两级结构成本较高、效率相对较低,所以现有的交流光伏水泵提水系统控制器一般不采用两级结构,而是采用单级结构^[6],交流光伏水泵提水系统控制器示意图如图 3 所示。

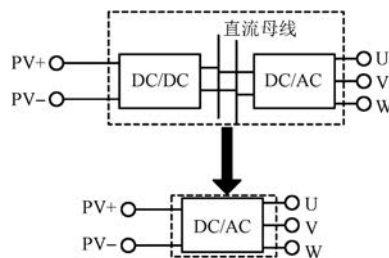


图 3 交流光伏水泵提水系统控制器示意图

由图 3 可以看出,现有的交流光伏水泵提水系统控制器结构中已经没有类似于图 1、图 2 中的直流母线。因此,文献[4-5]提出的功率补偿设计方案并不适用于现有的交流光伏水泵提水系统。此外,现有的交流光伏水泵提水系统采用三相交流离心泵,不同于文献[4-5]中的单相 220 V 交流负载,更凸显了现有功率补偿设计方案的局限性。

2 功率补偿控制器原理及控制策略

2.1 负载分析

要设计交流光伏水泵提水系统专用的功率补偿控制器,必须对水泵负载进行具体分析,而离心泵是最为常用的水泵^[7]。离心泵的功率由式(1)决定^[8]:

$$P_p = \frac{\rho g Q H}{\eta_p} \quad (1)$$

式中: P_p ——离心泵功率;

ρ ——介质密度;

g ——重力加速度;

Q ——流量;

H ——扬程;

η_p ——离心泵的效率。

当液体的黏度很小(如清水)且离心泵的效率恒定时,离心泵的流量、扬程、功率和转速满足:

$$\begin{cases} \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \\ \frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \end{cases} \quad (2)$$

当 $\frac{n_1 - n_2}{n_1} \leq \pm 20\%$ 时,可以认为离心泵的效率 η_p 保持恒定。

又因为

$$\frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

代入式(2)中,有:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (4)$$

因此离心泵的负载转矩和转速的平方成正比,即离心泵负载属于平方转矩负载,负载本身不会突变,只会根据光伏水泵提水系统输入功率的变化而变化。因此,在进行功率补偿控制器的设计时,只需要着重考虑输入功率的变化,不需要考虑负载的变化。

2.2 功率补偿器设计原理

考虑到离心泵负载属于平方转矩负载,当输入功率恒定时,离心泵的转速将始终保持恒定。因此,使用三相不可控整流电路将三相市电接入到光伏阵列连接的直流母线上,保持功率补偿时输入功率恒定,功率补偿器设计原理图如图4所示。

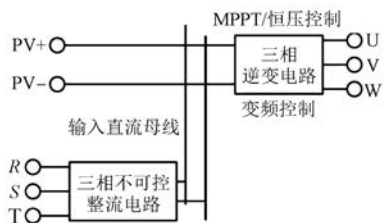


图4 功率补偿器设计原理图

采用三相不可控整流电路,一方面不需要控制电路,降低了制造成本,也简化了控制策略;另一方面在进行功率补偿时保持输入电压即输入直流母线电压恒定,增强了系统的稳定性。具体的工作原理如下。

光伏阵列通过PV+、PV-接口直连直流母线;三相市电通过三相不可控整流电路变换成直流电输出到直流母线上。直流母线连接三相逆变电路将直流电变换成三相交流电输出到U、V、W输出接口,接上三相交流水泵即可工作。

根据图4,为了实现光伏优先、市电补充的工作模式,当光伏阵列的最大输出功率足够时,必须使光伏阵列的最大功率点电压即PV+、PV-端口的输入电压不低于三相市电经过三相不可控整流电路整流之后的电压。当光电池温度保持不变时,光伏阵列的开路电压只是略微降低,主要是输出电流降低了。因此只要预先配置好光伏阵列模块的串并联数量,就可以使光伏阵列的输出电压不低于三相不可控电路整流之后的电压。

当光伏阵列的最大输出功率足够时,直流母线电压较高,此时三相不可控整流电路的输出电压低于直流母线,因此光伏阵列优先供电,三相电不供电。此时三相逆变电路可对光伏阵列进行MPPT控制^[9],以提高光伏阵列的效率。

当光伏阵列的最大输出功率不够时,直流母线电压较低,三相市电接入,将直流母线电压抬升到三相市电整流之后的电压。由于光伏阵列可看作是电流源,因此光伏阵列的输出仍然优先,根据U-I曲线输出相应的电流。此时三相市电作为补充能源向水泵供电。由于光伏阵列的输出电压恒定,因此对光伏阵列进行恒压控制。

2.3 控制策略

使用霍尔传感器对三相不可控整流电路的输出电流进行监测。当光伏阵列输入功率足够时,三相不可控整流电路输出电流为零,此时对光伏阵列进行MPPT控制,控制算法如图5所示。

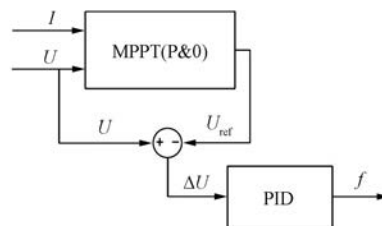


图5 MPPT控制算法

使用ADC对光伏阵列的输入电压U和输入电流I进行采样,然后使用MPPT控制算法中的扰动观察法(Perturbation and Observation, P&O)

计算得到当前采样周期的参考电压 U_{ref} , 将下一个采样周期的光伏阵列输入电压 U 和参考电压 U_{ref} 相减, 得到电压差 ΔU , 再通过 PID 调节器得到给定频率信号 f , 即三相逆变电路的输出频率^[10]。

当光伏阵列输入功率不够时, 三相不可控整流电路输出电流大于零, 此时对光伏阵列进行恒压控制。

2.4 硬件设计

功率补偿控制器的硬件设计框图如图 6 所示。

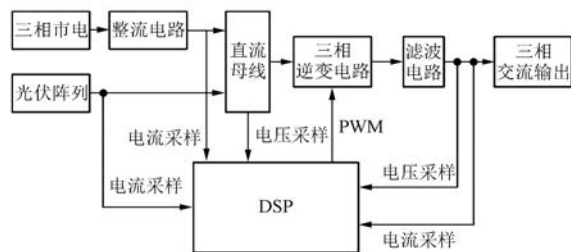


图 6 硬件设计框图

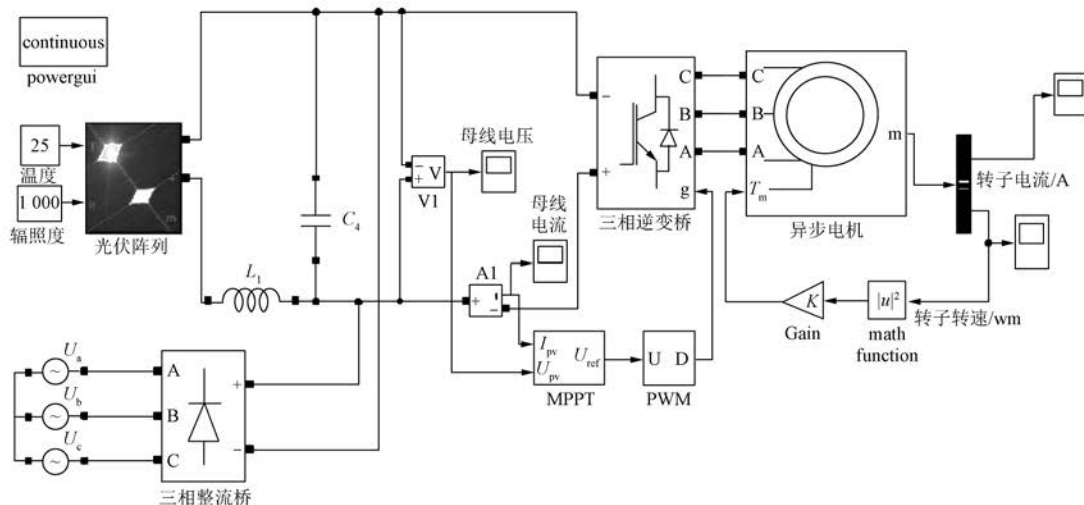


图 7 仿真模型

图 7 中, 光伏阵列模型选用 MATLAB 内置的 PV Array 模块, 型号为 1Soltech 公司的 1STH-230-P 模块, 在 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的辐照强度和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的光电池温度下, 最大功率为 228.735 W , 最大功率点的输出电压为 29.9 V , 最大功率点的输出电流为 7.65 A 。将 18 个该模块按照 2×9 (2 为并联数量、9 为串联数量) 组成光伏阵列, 在 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的辐照强度和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的光电池温度下, 最大功率约为 $4\,117.23\text{ W}$ 。三相不可控整流电路^[13]和三相逆变电路^[14-16]均采用通用桥模块, 开关管分别设为电

在图 6 中, 使用 HNC-661 霍尔电流传感器进行电流采样, 使用采样电阻和运放进行电压采样^[11]。核心功率电路三相逆变电路采用 FAIRCHILD 公司的 FSBB3 智能功率模块, 芯片内部不仅封装了 6 个高性能 IGBT 模块, 还封装了驱动电路以及过压过流保护电路, 既便于控制, 又具有极佳的可靠性, 十分适合光伏水泵提水系统 24 h 连续运行。此外, 采用 TMS320LF2406A 芯片作为控制芯片, 通过 ADC 采样电压电流信号, 根据光伏阵列输入功率的变化选择 MPPT 控制算法或恒压控制算法, 输出相应的 PWM 控制信号到 FSBB3 智能功率模块。

3 仿真实验

根据提出的光伏水泵提水系统功率补偿控制器设计方案, 在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了相应的仿真模型^[12], 仿真模型如图 7 所示。

力二极管和 IGBT。负载为额定功率 4 kW 的异步电机, 控制算法为 MPPT 控制和恒压控制。

仿真参数设置如下: 初始辐照强度设置为 $1\,250\text{ W/m}^2$, 0.5 s 时降低到 $1\,000\text{ W/m}^2$; 1.5 s 时降低到 800 W/m^2 ; 2.5 s 时降低到 600 W/m^2 ; 光电池温度设置为恒定 $25\text{ }^\circ\text{C}$; 三相逆变电路频率设定为恒定 50 Hz ; 仿真时间设为 3.5 s 。仿真结果如图 8~图 10 所示。

由仿真结果可知, 在 0.5 s 之前, 光伏阵列输出功率足够, 进行 MPPT 控制; 0.5 s 之后, 光伏阵列输

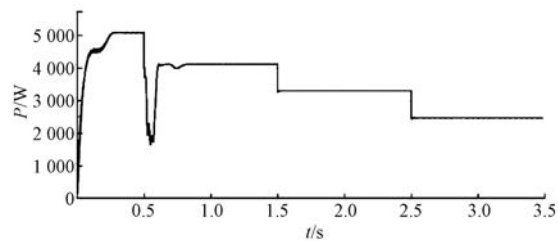


图 8 光伏阵列输出功率

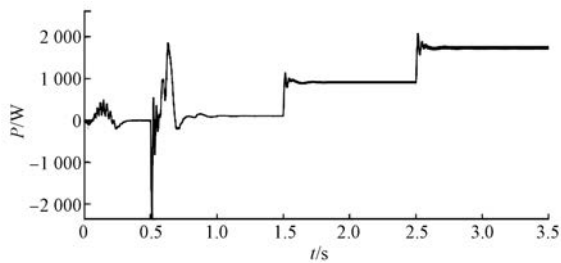


图 9 三相市电补偿功率

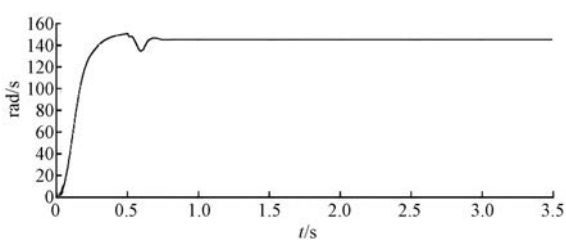


图 10 异步电机机械角速度

出功率不够,进行恒压控制。除了在仿真时间为 0.5 s 时,由于控制算法从 MPPT 控制切换到恒压控制,系统发生振荡导致异步电机转速出现小幅降低。其余时刻当光伏阵列的输出功率变化时,三相市电立刻对功率缺口进行补偿,异步电机的转速始终保持稳定。因此,仿真结果验证了提出的光伏水泵提水系统功率补偿控制器设计是有效的。

4 试验测试

根据本文提出的功率补偿控制器设计方案,在试验室搭建了相应的测试平台。试验测试所用的直流电源为 1 台额定功率为 18 kW、输出电压为 0~600 V 直流电压、输出电流为 0~30 A 直流电的可控直流电源;试验所用的三相电为三相市电。功率补偿控制器额定功率为 5 kW,所带的负载是三相电阻负载。在纯直流供电、纯交流供电、交直流同时供电 3 种工作模式下对功率补偿控制器进行了测试。

4.1 纯交流供电

功率补偿控制器只接入三相市电,不接入直流电。负载柜设置为额定负载 5 kW,对功率补偿控制器的输出电压和输出电流进行测量,试验数据如表 1 所示。

表 1 纯交流供电试验数据

交流输入 电压/V	输入 相电流/A	输出线 电压/V	输出 相电流/A	效率/ %
394	10.31	465	7.08	81.05

4.2 纯直流供电

功率补偿控制器只接直流电,不接入三相市电。负载柜设置为额定负载 5 kW,调节直流电源的输入电压和输入电流,对功率补偿控制器的输出电压和输出电流进行测量,纯直流供电试验数据如表 2 所示。

表 2 纯直流供电试验数据

直流输入 电压/V	直流输入 电流/A	输出线 电压/V	输出 相电流/A	效率/ %
562	10.71	466	7.07	94.80
550	9.72	426	6.54	90.26
513	10.12	426	6.76	96.07
480	8.96	377	5.97	90.64
480	8.96	377	5.97	90.64

4.3 交直流同时供电

功率补偿控制器同时接入直流电、三相市电。三相电阻负载设置为额定负载 5 kW,调节直流电源的输入电压和输入电流,对功率补偿控制器的输出电压和输出电流进行测量,以及测量三相市电的输入线电压和输入相电流,交直流同时供电试验数据如表 3 所示。

表 3 交直流同时供电试验数据

直流 输入 电压/V	直流 输入 电流/A	输入 线电 压/V	输入 相电 流/A	输出 线电 压/V	输出 相电 流/A	效 率/ %
538	9.95	391	0.77	463	7.06	96.37
542	9.75	393	0.99	463	7.04	94.75
541	9.53	393	1.21	463	7.04	94.42
540	9.35	392	1.47	463	7.01	92.96
538	9.17	393	1.65	463	7.02	92.95

表 3 中,输入线电压是指输入的三相线电压有效值的平均值,输入相电流的值是指输入的三相电流有效值的平均值,输出线电压是指输出的三相线电压有效值的平均值,输出相电流是指输出的三相相电流有效值的平均值,效率是指交流输出功率和交直流总输入功率的比值。

4.4 试验结果分析

当输入只有直流电源时,功率补偿控制器正常工作,此时功率补偿控制器的工作效率较高,均超过了 90%。

当输入只有三相市电时,功率补偿控制器正常工作,此时功率补偿控制器的工作效率相比纯直流供电时的工作效率略低,为 81.05%。

当输入同时有直流电源和三相市电时,当直流电源输出功率不足时,三相市电对功率缺口进行补偿,且随着直流电源的输出功率逐渐降低,三相市电的输出功率逐渐上升,实现了功率补偿控制器的基本功能,即光伏优先、市电补充的工作方式,此时功率补偿控制器的工作效率较高,超过 92.9%。但随着市电补偿功率的增加,效率逐渐降低。交流、直流同时供电功率如图 11 所示。

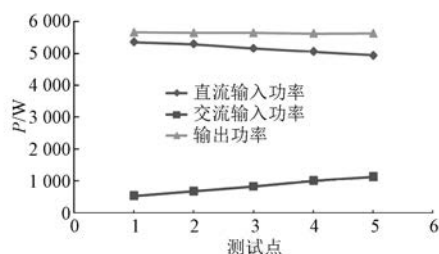


图 11 交流、直流同时供电功率图

由试验结果可得,本文提出的光伏水泵提水系统功率补偿控制器设计方案是可行的。

5 结 语

本文提出了一种通过三相不可控整流电路将三相市电直接接入到光伏阵列输入直流母线的功率补偿控制器设计方案。当光伏阵列输出功率不足时,采用恒压控制,三相市电自动对功率进行补偿;当光伏阵列输出功率充足时,采用 MPPT 控制,由光伏阵列单独供电。通过光伏优先、市电补充的工作模式,实现了光伏水泵提水系统的 24 h 连续高效运行。

此外,该设计方案只需要在现有的交流光伏水泵提水系统控制器的基础上添加一个三相不可控整流模块,不需要重新设计制造 PCB,只需要对控制器的外壳进行稍加修改,改进成本很低,具有较高的经济效益。

【参 考 文 献】

- [1] 万晓凤,康利平,余运俊,等.光伏水泵系统研究进展[J].科技导报,2014,32(27): 76-84.
- [2] 赵茜,周自玮,严娟,等.太阳能光伏提水技术在低纬高原地区的应用[J].科技创新导报,2015, (33): 99-101.
- [3] 陈名胜,汪飞,阮毅.光伏水泵系统研究现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2015,42(11): 47-55.
- [4] 王伟,吴彝,金科,等.太阳能光伏/市电联合供电系统[J].电工技术学报,2012,27(10): 249-254.
- [5] 胡孟杰,陈国定,黄学宇,等.基于市电补偿的光伏逆变器[J].太阳能学报,2015,36(7): 1610-1615.
- [6] 曹仁贤,余世杰,秦养浩,等.微处理器控制光伏水泵 SPWM 变频器的设计[J].太阳能学报,1997,18 (1): 59-64.
- [7] GHONEIM A A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems[J].Energy Conversion & Management,2006,47(11/12): 1449-1463.
- [8] KHADER S, DAUD A K. PV-grid tie system energizing water pump[J].Smart Grid & Renewable Energy,2013,4(5): 409-418.
- [9] 朱拓斐,陈国定.光伏发电中 MPPT 控制方法综述[J].电源技术,2011,35(10): 1322-1324.
- [10] 左鹏军.两种模式 PID 控制变频调速恒压供水系统[J].电气技术,2007(1): 43-45.
- [11] 杨鹏,史旺旺.太阳能供电的光伏水泵无刷直流电机控制系统[J].电机与控制应用,2009,36(6): 36-38.
- [12] 杨永恒,周克亮.光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J].电工技术学报,2011,26(增刊1): 229-234.
- [13] 韩航星,王金全,胡亚超,等.低压系统中电容滤波的三相不可控整流电路电压分析[J].船电技术, 2015,35(1): 69-72.
- [14] 彭柔,荣军,刘艳红,等.三相电压型逆变电路在 MATLAB 中的建模与仿真[J].电子技术,2015 (2): 9-12.
- [15] 吕启明,张万金,汪玉凤.三相异步电动机空间矢量 PWM 控制及仿真[J].煤矿机电,2011(3): 84-86.
- [16] 徐小勇.交流光伏水泵系统控制策略[J].电机与控制应用,2017,44(6): 113-119.

收稿日期: 2017-10-10