

# 光伏水泵系统研究进展

万晓凤, 康利平, 余运俊, 张燕飞

南昌大学信息工程学院, 南昌 330031

**摘要** 光伏水泵系统无需电网和燃油, 因而在干旱缺水地区及无电地区的应用前景非常好。然而光伏水泵在实际应用中存在系统造价昂贵, 最大功率点跟踪方法繁多但通用性差, 电机与水泵的类型选择和容量匹配复杂等难题, 这些问题制约着光伏水泵的推广使用, 亟待解决。通过对国内外论文中出现的光伏水泵系统的多种最大功率点跟踪技术、电机与水泵的选用方案及其容量匹配等进行综述, 总结了各种最大功率点跟踪技术的优缺点及其适用范围、各类驱动电机的应用范畴及水泵容量的匹配原则, 为不同应用条件下光伏水泵系统的合理选型提供了理论依据, 并对光伏水泵系统的优化设计提出5点建议, 提出光伏水泵系统今后的发展方向。

**关键词** 光伏水泵; 最大功率点跟踪技术; 容量匹配; 优化设计

**中图分类号** TK519

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.013

## A Review of the Photovoltaic Pump System

WAN Xiaofeng, KANG Liping, YU Yunjun, ZHANG Yanfei

Information Engineering School of Nanchang University, Nanchang 330031, China

**Abstract** The photovoltaic pump system is promising in the arid and non power grid areas, because it can operate without fuel and without being connected to a power grid. However, there are a lot of problems in the actual application of the photovoltaic pump system, such as the cost of the system is much too expensive, the maximum power point tracking (MPPT) involves various methods with poor universality, and the matching of the motor and the pump capacity is complex. These problems need to be addressed for the application of the photovoltaic pump system. This paper reviews the related domestic and overseas studies, including the MPPT technology, the selection schemes and their capacity matching of motor and water pump. The advantages and disadvantages of all kinds of MPPT technologies are summarized with respect to the scope of application, and the application scope of all kinds of drive motor and the capacity matching principle of pump as an adequate theoretical basis for the reasonable selection of a photovoltaic pump system under different application conditions. Finally we put forward five suggestions for the optimum design of the photovoltaic pump system, and point out the direction for further research and development of the photovoltaic pump system.

**Keywords** photovoltaic pump; maximum power point tracking technology; capacity matching; optimum design

中国西部干旱地区, 由于远离海洋, 云量少, 晴天多, 农牧业缺水严重。以新疆地区为例, 农业用水量  $0.8220 \text{ m}^3/\text{m}^2$  ( $548 \text{ m}^3/\text{亩}$ )<sup>[1]</sup> 是全国同等数据的 1/3; 牧草地面积虽然有  $5.1114 \times 10^{11} \text{ m}^2$  (76670.70 万亩), 但是其中只有  $3.4489 \times 10^{10} \text{ m}^2$  (5173.35 万亩) 为可灌溉草场<sup>[1]</sup>, 其余大部分是天然草场。灌溉难一直是困扰中国西部地区农业发展的难题。

自然灌溉困难, 就必须使用提水灌溉。常用的提水灌溉

方式有普通电力水泵、燃油机水泵、光伏水泵, 它们使用的能源不同, 因而适用范围各异。中国西部干旱地区, 尤其是新疆的南疆地区, 人口稀少, 居民居住分散, 一般村庄只有 20~50 户人家, 村庄之间距离却有几十到几百千米, 且平均距离电网 70 km 以上。由于这些地区远离电网, 交通不便, 在该地区每架设 1 km 的 11 kV 电网成本约 14 万元, 而每架设 1 km 的 35 kV 电网成本约 8 万元<sup>[2]</sup>。可见在新疆等西部地区, 电网

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-05-19

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFG72240); 江西省科技支撑计划项目(2013BBE50102)

作者简介: 万晓凤, 教授, 研究方向为计算机控制与嵌入式智能仪表、光伏智能微网控制, 电子信箱: xfwan\_jx@163.com; 余运俊(通信作者), 博士, 研究方向为光伏智能微网控制、低碳电力, 电子信箱: yuyunjun@ncu.edu.cn

引用格式: 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.

的架设成本很高,利用率却非常低。因而在该地区架设电网是不现实的,难以通过普通电力水泵为其提水灌溉<sup>[3]</sup>。

若在该地区采用燃油价格昂贵的柴油机水泵,长期下来不仅成本高、污染大,也不利于能源的可持续利用。刘旭帅和王燕<sup>[4]</sup>将1 kW 光伏水泵和柴油机水泵进行经济效益分析,得到表1所示数据(太阳能电池按25年折旧,其余设备按8年折旧,提水扬程为10 m,燃油按7元/L计算)。

表1 光伏水泵与柴油机水泵的经济性对比

Table 1 Economic comparison of photovoltaic water pump and diesel engine pumps

提水装置	总投资/ 元	年维护 费/元	年耗 柴油/L	提水/ km <sup>3</sup>	提水成本/ (元·m <sup>-3</sup> )
光伏水泵	20000	150	0	320	0.035
柴油机水泵	1800	610	1600	400	0.320

由表1可见,柴油机水泵虽然初期投资低,但随着运行时间的增加,其燃油消耗量将不断增加,每立方米的提水成本逐年增长;光伏水泵尽管一次性投资较大,但其维护费用极低,提水成本逐渐下降。5年以后,柴油机水泵的提水成本将是光伏水泵提水成本的两倍还多<sup>[4]</sup>。在水资源严重匮乏的约旦, Mohammad 和 Al-Smairan<sup>[5]</sup>也做了相似的经济分析,得到类似的结论。就长久的经济和环境效益而言,选择光伏水泵比使用柴油机水泵效果更优。

灌溉困难的偏远地区缺水严重但太阳能资源丰富,而且有些区域还蕴藏着丰富的地下水资源,完全具备实施光伏水泵提水灌溉的条件<sup>[6]</sup>。光伏水泵系统利用来自太阳的持久能源,日出而作,日落而歇,无需人员看管,不需要燃油、不需要电网,而且可持续利用、无污染,可移动性好,是一套非常适用于偏远地区的独立的提水灌溉系统<sup>[7,8]</sup>。综上可知,在灌溉困难的偏远地区,光伏水泵相较于普通电力水泵和柴油机水泵具有更优的经济和环境效益,其应用前景非常可观。在农业灌溉方面,光伏水泵系统的广泛应用可扩大有效耕地面积,能为农田、菜地、果园提水灌溉,大大提高该地区的粮食、蔬菜、水果产量。在荒漠治理方面,光伏水泵可以从深井抽水来浇灌干旱沙化地带的草地、树木,解决沙漠绿化的浇灌难题<sup>[9]</sup>。在生活用水方面,光伏水泵可广泛用于无电地区的人畜用水,以及边防、海岛哨所等高度分散点的用水<sup>[10]</sup>。在城市水景方面,光伏水泵在市政工程、城市广场、宾馆饭店以及住宅社区的景观喷水系统中,得到了越来越多的应用,体现出新能源环保价值观,成为城市和企业的形象名片<sup>[11]</sup>。

虽然光伏水泵系统能很好解决中国西部干旱地区的用水困难问题,但是光伏水泵系统在实际应用过程中面临的一些问题制约着光伏水泵系统的推广使用。这些亟待解决的问题主要有:1) 光伏水泵系统造价昂贵。常见的光伏水泵系统是通过单、多晶硅光伏电池组件完成太阳能到电能的转换<sup>[12]</sup>。

然而这类光伏电池组件价格昂贵,转换效率却只有18%<sup>[13]</sup>,因此为满足系统供电需求,需要使用大量的光伏组件,导致光伏水泵高昂的系统造价。2) 光伏阵列的最大功率点跟踪方法多,适用范围窄。为提高系统效率,光伏水泵控制系统都采用最大功率点跟踪技术优化太阳能电池与负载之间的匹配,保证太阳能电池时刻处于最大功率点工作。但是,最大功率点跟踪技术的实现方式很多,应该选择最恰当的方式,不能盲目套用。3) 电机和水泵型号繁多,匹配复杂。实际应用中应该根据光伏水泵系统的设计功率和扬程大小,选择合适的电机,并匹配适宜的水泵。本文综述光伏水泵系统的多种最大功率点跟踪技术、电机与水泵的选用方案及其容量匹配等,比较各种技术方案的优缺点,并给出各种最大功率点跟踪技术的适用范围和电机与水泵的对应匹配方案,针对光伏水泵系统的优化设计提出5点建议。

## 1 光伏水泵系统的结构

光伏水泵系统的基本工作原理是利用太阳能电池直接将太阳能转化为电能,然后通过控制器驱动电机带动水泵运行。具体应用时,再根据不同扬程和日用水量的需求配以相应功率的太阳能电池阵列和适宜类型的电机水泵<sup>[4]</sup>。光伏水泵系统的结构如图1所示,系统由光伏阵列、控制系统与变压环节、驱动电机、水泵和储水系统5部分组成。其中,光伏阵列(photovoltaic array)是由若干个单位光伏电池板连结而成的。因为单位光伏电池板的功率很小,一般不够使用,所以将数块光伏电池板以串并联的形式连结在一起以满足各种供电需要<sup>[5]</sup>。控制系统与变压环节包括DC/DC电路、蓄电储能电路、控制电路等,其中控制电路用来完成光伏阵列的最大功率跟踪控制,逆变器的PWM控制以及电机的转速控制。当系统选用交流电机时,选择A方案通过逆变器将直流电逆变成交流电,再驱动交流电机;当系统选用直流电机时,选择B方案直接驱动直流电机或对电压值进行适当变换后驱动直流电机。电机与水泵的选型根据系统的设计功率和扬程大小而定,常用的电机有直流无刷电机、三相异步电机、永磁同步电机等;水泵的选择以与电机合理匹配为原则。储水系统是光伏水泵系统的蓄水箱,在系统水箱灌满时,光伏阵列不再驱动电机而改为向蓄电池充电。在太阳能较弱或者阴雨天气条件下,蓄电池带动电机进行提水作业。用于城市水景的光伏水泵系统则不需要蓄水箱<sup>[16]</sup>。

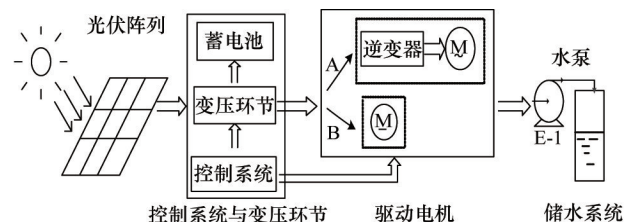


图1 光伏水泵系统的结构

Fig. 1 System structure of photovoltaic pump

## 2 光伏阵列的最大功率点跟踪技术

由于太阳能发电前期的投入成本较高,致力于提高光伏系统光电转化效率、降低光伏发电成本一直是光伏领域研究的热点之一。对光伏水泵系统而言,为提高效率必须保证系统在不论何种日照及温度条件下,始终使太阳能电池阵列处于最大功率输出状态,即要保证系统在当前气象条件下始终获得最大扬水量。由于日照及温度条件是时刻变化的,光伏阵列相应产生的电压、电流也会随着变化,因此光伏系统的最大功率点是不停波动,这使得光伏系统维持最大功率点较难实现。最大功率点的跟踪实质上是一个自寻优的过程,即通过控制太阳能电池的端电压,使电池能在各种不同的日照和稳定环境下智能化地输出最大功率,不断获得最大功率输出,即太阳能电池的最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。

目前,国内外研究和应用的MPPT算法有很多,主要有恒定电压法(CVT)、扰动观察法(P & O)、神经网络法、模糊控制法、最优梯度法、电导增量法(IncCond)等<sup>[17]</sup>。虽然MPPT算法很多,但是每种算法都有一定的适用范围和各自的优缺点,具体应用时应该合理选择,不能盲目套用。

### 2.1 恒定电压控制法

光伏阵列工作过程中,当温度保持恒定时,光伏阵列在最大功率点处的工作点基本固定在某一个电压值附近。于是将光伏阵列的最大功率点电压和开路电压近似为线性关系,得到恒定电压控制法(CVT)<sup>[18]</sup>。该方法实现了对最大功率点处电压 $U_{MPPT}$ 的负反馈闭环控制,待该闭环控制系统稳定后即可找到最大功率点,具体做法见图2。CVT控制简单且易实现,系统工作电压具有良好的稳定性。但是 $U_{MPPT}$ 幅值的给定需凭借经验预估并辅以实测调整。而在实际使用时,冬夏轮回、晨昏交替,气温与日照都会有很强烈的变化,这就给 $U_{MPPT}$ 的幅值确定带来了不便<sup>[19]</sup>。

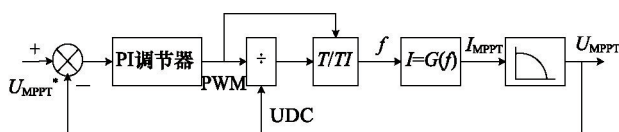


图2 CVT型最大功率点跟踪控制原理

Fig. 2 Control principle of CVT type of maximum power point tracking

### 2.2 扰动观察法

扰动观察法又称爬山法,通过测量太阳能电池第*i*时刻的电压 $V_i$ 和电流 $I_i$ ,由 $P_i = V_i I_i$ 计算出功率 $P_i$ 。然后与第*i*-1时刻功率比较。根据比较的结果调节太阳能电池的工作点<sup>[20]</sup>。这里引入一个参考电压 $V_{REF}$ ,当进行比较后,调解参考电压,使之逐渐接近最大功率点的电压,具体做法见图3。扰动观察法简单易懂,容易实现,是目前比较常用的方法。但该方法

依赖于 $V_{REF}$ 初始值的设定,不适于气候快速变化的情况。当 $V_{REF}$ 初始值与最大功率点的电压相差较大,且调整因子 $\Delta V$ 设置不是很合理时,将会花较长的时间才能使工作点到达最大功率点,而且有可能导致工作点远离最大功率点<sup>[21]</sup>。

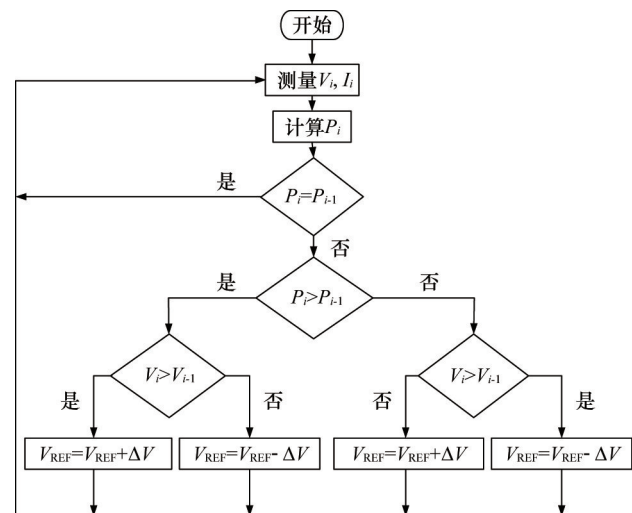


图3 扰动观察法流程

Fig. 3 Flow chart of disturbance observation

### 2.3 神经网络法

神经网络法是基于神经网络的MPPT控制算法。最普通和常用的多层神经网络结构有3层神经元:输入层、隐含层和输出层。应用于光伏阵列时,输入信号可以是外界环境的参数,光伏阵列的参数例如开路电压、短路电流,也可以是上述参数的合成量。输出信号可以是经过优化后的输出电压、变频器的占空比信号等<sup>[22]</sup>。文献[23]中将温度和光强作为输入变量,通过反向传播(BP)神经网络识别后得到最大功率点。仿真表明所提出的方法具有良好的适应性,显著提高了光伏系统的转换效率。文献[24]中应用反向传播(BP)和径向基(RBF)神经网络分别辨识光伏阵列的最大功率点。在变化的环境条件下,使用Matlab软件对这2种神经网络进行仿真、训练及测试。仿真表明,RBF神经网络比BP神经网络更快捷、更准确地跟踪了光伏阵列的最大功率点。神经网络法跟踪效果较好,但样本获取过程较难,且要根据系统参数变化不断对模型做出调整,否则就不能达到预期的效果。

### 2.4 模糊控制法

模糊控制法是一种典型的智能控制方法,其实现可以分为模糊化、控制规则评价和解模3个步骤<sup>[25]</sup>。模糊控制器的输入通常为误差和误差变化量,光伏阵列工作在最大功率点时的误差量为0。文献[26]中介绍了光伏阵列MPPT的模糊控制法,考虑到光伏阵列的输出特性随负载及外界环境的变化而变化,于是把最大功率探索方法模糊化,在功率比较法的基础上,引入模糊控制以改善其性能。文献[27]中通过实测数据自动生成模糊控制规则,并将其嵌入模糊控制器当中去,以实现MPPT控制功能。仿真结果显示,采用该方法生成

模糊规则准确实用,系统动态性能和稳态性能均十分优越。模糊控制法能够快速响应外部环境变化,具有较好的动态特性和控制精度,但模糊规则的建立是以专家经验为基础的。而在光伏阵列 MPPT 控制中专家经验并不完备,因此存在一定的局限性。

### 2.5 最优梯度法

由于光伏阵列的功率  $P_k$  和电压  $U_k$  成非线性关系,可以采用基于最优梯度法的 MPPT 求取目标函数(光伏阵列最大功率)最大值,每步迭代的搜索方向选取函数的正梯度方向(步时数为  $k$ ),并逐步逼近功率的最大值<sup>[28]</sup>,具体的控制流程参见图 4。文献[29]中提出了一种滞环比较法和最优梯度法相结合的最大功率点跟踪算法,解决了最大功率点跟踪过程中速度和精度的矛盾。仿真结果表明该改进 MPPT 算法能在很大程度上抑制振荡和误判现象。最优梯度法控制稳定度高,当外部环境参数变化时,系统能快速追踪其变化,不受功率时间曲线的影响。但是在外界环境条件发生改变时,由于控制作用较强,因此输出功率有所波动,控制算法较复杂。

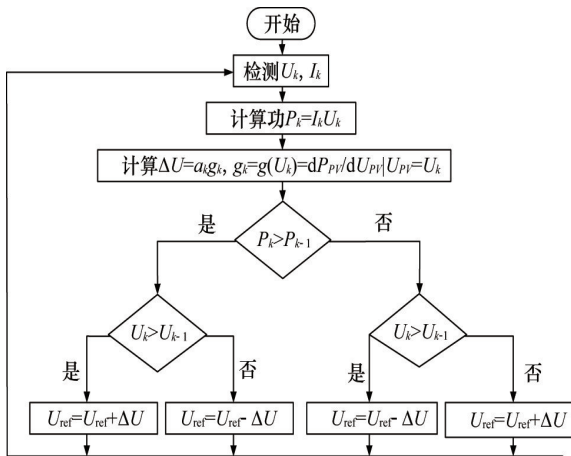


图4 最优梯度法控制流程

Fig. 4 Control flow chart of optimal gradient method

### 2.6 定步长电导增量法

定步长电导增量法是目前常用的最大功率点跟踪方法之一。其基本原理是通过判断输出电导的变化值和瞬时电导值的大小来决定光伏阵列输出电压的变化方向<sup>[29]</sup>。如图 5 所示,通过设定一个变化值  $\Delta U$  判断当前光伏阵列工作在最大功率点(MPP)的哪一侧。在 MPP 右侧时,变化值为负;在 MPP 左侧时,变化值为正。从一个稳态过渡到另一个稳态时,根据输出电流的变化就能作出正确判断,最终稳定在 MPP 的邻域内<sup>[30]</sup>。电导增量法本身就是一种改进的扰动观察法,以动态变化光伏电池输出电压跟踪最大功率点,电导增量法的主要特点是控制精度高、稳定性好,且与光伏电池输出特性及参数无关。电导增量法是多种最大功率跟踪方法中跟踪准确性最高的一种方法,可使系统在环境快速变化的情况下具有良好的跟踪性能。在辐照度和温度变化时,太阳

能电池阵列的输出电压能平稳追随环境的变化,且输出电压波动小。但是定步长的电导增量法在步长选择上无法兼顾控制精度和跟踪速度。步长过小,将导致光伏阵列长时间滞留在低功率输出区;步长过大,将导致系统振荡加剧<sup>[31]</sup>。

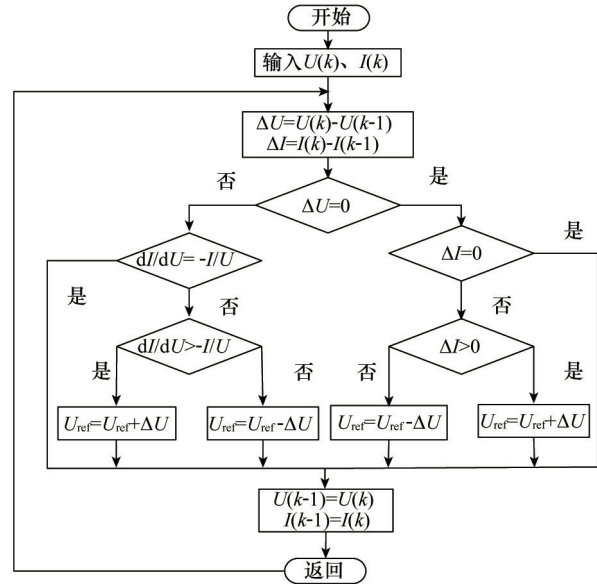


图5 电导增量法流程

Fig. 5 Flow chart of conductance increment method

### 2.7 变步长电导增量法

针对定步长电导增量法的缺点,人们提出了改进和优化后的变步长电导增量法。当工作点远离 MPP 时,加大步长,提高跟踪速度;在 MPP 附近时,自动减小步长,以减小波动导致的功率损耗<sup>[32]</sup>,具体做法见图 6。

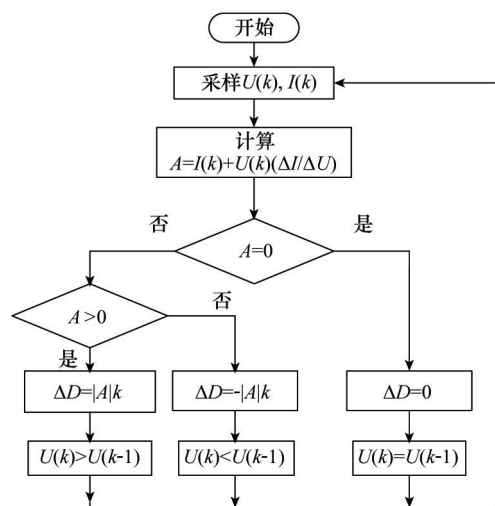


图6 变步长电导增量法控制流程

Fig. 6 Control flow chart of variable step length conductance increment method

文献[33]根据  $U-I$  特性曲线,把区域分为恒流源区和恒压源区,提出了通过检测电流变化率的大小来变步长的电导增量法。文献[34]中提出了以  $IdP/dU$  为变步长的系数,并在 Boost 电路中通过改变占空比来调节光伏阵列两端的电压值,使其跟踪 MPP 的电导增量法。最后在特定的参数环境下对定步长和变步长电导增量法进行了仿真实验对比,变步长电导增量法在大约 0.03 s 时结束暂态过程;而定步长电导增量在 0.08 s 时结束暂态,而且接近稳态时的振荡比变步长电导增量更大。变步长电导增量法继承了定步长电导增量法的所有优点,同时有效地解决了定步长所带来的控制精度与跟踪速度间的矛盾,能够快速、准确地完成光伏阵列最大功率点的跟踪。

不断优化光伏系统 MPPT 控制算法是人类在利用太阳能资源过程中智慧的体现,光伏发电系统是一个很强的非线性系统,加之太阳能电池很难用一个精确的数学模型进行描述,因此在实际的光伏阵列最大功率点跟踪控制中一般不采用单一的 MPPT 控制算法,更多的是采用组合型控制算法实现 MPPT 控制。常见的组合型 MPPT 控制算法有固定电压法与电导增量法的有机结合、变步长电导增量法与扰动观察法的有机结合、神经网络法和模糊控制法的有机结合等<sup>[35]</sup>。其中应用最广泛的变步长电导增量法与扰动观察法的组合法是根据变步长电导增量法自身的优点,当系统远离最大功率点的时候采用扰动观察法,当系统位于最大功率点附近的时候采用变步长电导增量法的跟踪技术<sup>[36]</sup>。在速度上由扰动观察法来保障,在精度上由变步长电导增量法来支撑,这样的设计方案思路明确,易于实现,在性价比方面有着良好的观望性。可见将各种 MPPT 控制算法取长补短,有机结合,能更有效地对光伏阵列输出功率的 MPP 进行跟踪。组合型 MPPT 控制算法是今后 MPPT 控制策略改进的新方向。

### 3 光伏水泵系统的电机选择

光伏水泵系统的负载是电机水泵。光伏水泵系统电机的可用类型有传统直流电动机、直流无刷电动机、三相异步电动机、永磁同步电动机、磁阻电动机等。从目前光伏水泵行业的使用情况看,应用最为广泛的是直流无刷电机、三相异步电机和永磁同步电机 3 种。

#### 3.1 无刷直流电机驱动光伏水泵的技术

在光伏水泵系统中采用直流无刷电机驱动水泵,结构如图 7 所示。直流无刷电机的输入电压为直流电,因而可与太阳能电池直接连接,或通过简单的功率变换装置与太阳能电池阵列进行连接,使用非常方便。另外,直流无刷电机利用电子换相代替了机械换相,具有控制简单、运行效率高、功率密度大等优点。电子换相逆变器用来控制电机定子上各相绕组通电的时间和换相顺序,主要由逻辑开关单元和位置传感器信号处理单元两部分组成。逻辑开关单元是控制电路的核心,其功能是将直流电源按一定的逻辑关系分配给直

流无刷电机定子上的各相绕组以产生旋转的磁场,使直流无刷电机能产生持续不断的电磁转矩。传统的直流无刷电机是通过霍尔传感器来确定转子位置的,但这种外加传感器的方式不仅增加了电机的制造成本,而且安装困难,在电机运行过程中震动易脱落,降低了系统的可靠性。因而近年来无位置传感器直流无刷电机控制技术的应用越来越广泛。

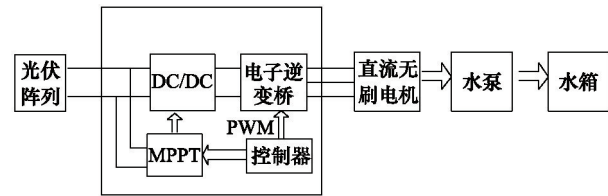


图 7 选用无刷直流电机的光伏水泵系统结构

Fig. 7 Structure of the photovoltaic pump system with brushless dc motor

文献[37]中采用有位置传感器的无刷直流电机,通过来自位置传感器的检测信号确定各相定子绕组导通的顺序和时间。使用这种电机的光伏水泵系统的抗干扰能力较差,寿命较短。文献[38]中采用无位置传感器的无刷直流电机,利用反电势过零法确定各相定子绕组导通的顺序和时间。使用这种电机的光伏水泵系统可靠性高,抗干扰能力强。直流无刷电动机既具有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等优点,又具有普通的直流电动机的运行效率高、励磁损耗小以及调速性能好等优点。但是直流无刷电机价格昂贵,控制要求过高,功率小且易形成共振。这些缺点大大限制了直流无刷电机在光伏水泵系统中的运用。

#### 3.2 三相交流电机驱动光伏水泵的技术

光伏水泵系统也常用三相交流电机来驱动电机水泵,其系统结构如图 8 所示。三相交流电机的三相定子绕组需通入三相对称交流电,方能产生驱动转子旋转的旋转磁场。然而光伏阵列产生的是直流电,因此采用三相交流电机驱动的光伏水泵,必须通过专用的变频装置才能和太阳能电池进行连接。这个专用的变频装置就是将直流电逆变为给定幅值和给定频率的交流电的逆变器。在光伏水泵系统中常用的三相交流电机有三相异步电机和永磁同步电机两种。

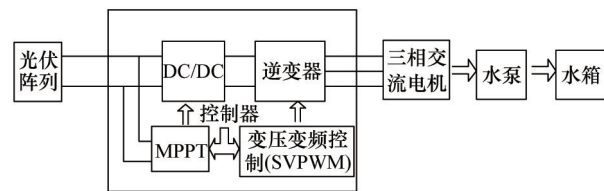


图 8 选用三相交流电机的光伏水泵系统结构

Fig. 8 Structure of photovoltaic pump system with three phase ac motor

由于电机控制技术和控制装置的发展,异步电动机的应用范围越来越广泛。随着变频调速技术的不断完善,使得异步电动机也能应用于过去只能使用直流电动机的领域,并有逐渐取代直流电动机的趋势。文献[39]中的光伏水泵系统采用三相异步电机驱动水泵抽水,成功地完成了提水灌溉任务。三相异步电机结构简单,制造方便,运行性能好,并可节省各种材料,价格便宜,三相异步电机的效率在75%~95%之间<sup>[40]</sup>,相对较高。光伏水泵产业中三相异步电机使用较多。

采用永磁同步电机驱动光伏水泵,也能顺利地完光伏水泵的提水任务。与传统的电励磁同步电机相比,永磁同步电机具有损耗少、效率高、节电效果明显的优点。因为永磁同步电动机以永磁体提供励磁,使电动机结构更为简单,降低了加工和装配费用,且省去了容易出问题的集电环和电刷,提高了电动机运行的可靠性。

再者,永磁同步电机无需励磁电流,没有励磁损耗,提高了电动机的效率和功率密度,电机效率达到95%,明显高于其他类型电机。因而它是近几年研究较多并在光伏水泵系

统中应用越来越广泛的一种电动机。文献[41]中通过对新型永磁同步电机与普通异步电机在水厂中的应用进行现场对比试验,经过检测和数据分析,该永磁同步电动机较原异步电机配水单耗降低了5%,无功功率降低了91.3%,功率因数达到了0.99,运行电流明显降低,大大减小了变压器及输电线路损耗,节能效果显著。

### 3.3 交直流光伏水泵系统的比较

通过对常用于光伏水泵系统的直流无刷电机、三相异步电机和永磁同步电机的工作性能的分析<sup>[42]</sup>,得到交直流光伏水泵系统的性能比较如表2所示。

从表2可得到选择光伏水泵系统电机的几点结论:1) 直流光伏水泵系统适用于小功率系统中,大功率系统更适合于交流光伏水泵系统;2) 交流水泵市面普及率高,利于改造,直流水泵是专用的,不利于维护;3) 直流光伏水泵系统成本较高,交流光伏水泵系统成本低廉;4) 直流光伏水泵系统效率比交流光伏水泵更高。在实际的电机选择过程中,应根据光伏水泵系统具体的应用要求,选择一种最适合的电机。

表2 交直流光伏水泵的性能比较

Table 2 Performance comparison of AC/DC photovoltaic water pump

水泵系统	转换效率	系统设计功率/kW	电机的匹配性	扬程/m	工作寿命	系统成本
交流光伏	采用高压开关器件和全桥设计,损耗高,转换效率较低	0.5~500	符合市场上常见的普通水泵,利于项目改造	≤300	交流泵的寿命等同直流无刷泵	较低
直流光伏	采用低压开关器件和高频斩波电路设计,损耗小,转换效率高	<2	专有的直流水泵,维护困难且市场狭窄	≤100	直流有刷寿命短,无刷寿命长	较高

## 4 光伏水泵系统中的水泵的选择

### 4.1 水泵的扬程和流量的确定

在光伏水泵系统中,水泵是核心部件,其效率和工作特性直接影响光伏系统的效率,所以水泵的选型需要关注电机的输出功率、扬程、流量。陈万青等<sup>[43]</sup>以离心泵系统为对象,基于泵外特性对离心泵系统进行了本体建模,该离心泵模型在额定转速下的扬程与流量间的关系为

$$H_0 = \beta_1 Q_0^3 + \beta_2 Q_0^2 + \beta_3 Q_0 + \beta_4 \quad (1)$$

根据表征离心泵扬程与转速、流量与转速关系的相似定律

$$H_0 = \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 H \quad (2)$$

$$Q_0 = \frac{n_0}{n} Q \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)中,可得到对于不同转速的离心泵的扬程、流量、转速之间的关系表达为

$$H = \beta_1 Q^3 \frac{n_0}{n} + \beta_2 Q^2 + \beta_3 Q \frac{n}{n_0} + \beta_4 \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (4)$$

式中, $Q_0, Q$ 为离心泵额定流量和泵变速后的流量; $H_0, H$ 为离心泵额定扬程和泵变速后的扬程; $n_0, n$ 为离心泵额定转速和泵变速后的转速; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 为相应的比例参数。根据式(1)~式(4),便可以求解出离心式水泵启动的过渡过程。

光伏水泵系统中离心泵的选择非常重要,离心泵的轴功率不能大于电机的额定输出功率。为提高系统工作效率,防止大马拉小车的状况,离心泵轴功率最好在略低于电机额定输出功率处。供应光伏水泵的水源一般是水井,设其深度为 $H_1$ ,那么离心泵工作状态下的扬程应该大于 $H_1$ 。光伏水泵提水后先存入储水箱,待储水箱满后即停止提水,提水状态下光伏水泵的流量 $Q$ 越大越好。因为 $Q$ 越大,需注满水箱的时间就越短,电机的工作时间越短。光伏水泵不提水时,光伏阵列将发出的电能存储在蓄电池中,以备夜间或者太阳能较弱的白天使用。由图9可以看出,离心泵的流量 $Q$ 和驱动电机的转速 $n$ 成正比,则离心泵扬程和流量的最佳匹配原则是在保证水泵扬程大于水井深度的前提下,通过控制驱动电机转速 $n$ 使离心泵流量最大化。

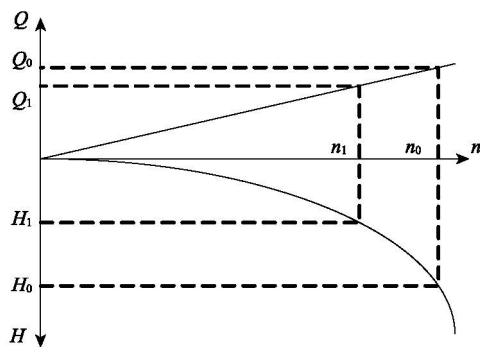


图9 离心泵扬程、流量和转速的关系

Fig. 9 Relationship between the head of delivery, the flow rate and the rotational speed of centrifugal pump

#### 4.2 光伏水泵与电机的容量匹配

光伏水泵系统的一切措施都是为了能稳定、可靠地多出水,或者说最后都要落实在选取适宜容量的电机与水泵,并使它们工作在最高效率处。令电机的输入电压为 $U$ ,输入电流为 $I$ ,水泵的扬程为 $H$ ,流量为 $Q$ 。则光伏水泵的电机输出功率与水泵效率间存在关系

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{2.73HQ}{P} \quad (5)$$

式中, $P=UI$ ,为电机功率; $\eta_{\text{sys}}$ 为水泵的效率。

根据式(5)可得出特定扬程、流量下水泵效率的特性曲线。通过控制电机转速,使系统的扬程或者流量达到需要值便可测试不同工况下的水泵效率<sup>[44]</sup>。为使系统高效运行,配置电机容量时应考虑使水泵工作于最大工作效率处。

### 5 讨论

#### 5.1 光伏水泵系统优化设计的建议

通过对光伏水泵系统中的多种最大功率点跟踪技术以及电机、水泵的选用方案等进行综述,明确了各种技术方案的优缺点,并给出了各种最大功率点跟踪技术的适用范围和电机与水泵的对应匹配方案。从中归纳出对光伏水泵系统优化设计的建议。

1) 最大功率点跟踪方法有很多种,且分别有不同的适用范围,其选用一般视具体情况而定。但是由于控制精度高,跟踪速度快,稳定性性能好等特点,变步长电导增量法与扰动观察法的组合型MPPT法是目前最大功率点跟踪效果最好的一种方法,在光伏水泵系统的设计中推荐使用。

2) 光伏水泵系统电机的选择同样要视不同工况而定。若系统为小功率系统或对电机调速性能要求较高则建议使用成本较高的直流无刷电机;若光伏水泵系统为大功率系统且对系统造价有一定限制,则常见的三相异步电机是最优的选择;若要求系统损耗小,效率高则可以选用永磁同步电机。

3) 合理匹配水泵的容量,使水泵效率最大化。光伏水泵系统中水泵的确定是由扬程、流量以及水泵轴功率三者决定

的。在实际的选择过程中,首先要根据当地的地下水位特点和具体的提水高度要求确定光伏水泵的扬程范围;然后根据单位时间的需水量并结合式(4)确定水泵的流量范围;最后根据之前选择好的驱动电机的输出功率,选择对应的水泵的轴功率。3个参数的最终确定以满足式(5)并使水泵效率达到最高为原则。

4) 合理选择光伏阵列数量。导致整个光伏水泵系统成本过高的原因是光伏阵列价格过高,因此在系统容量匹配过程中,要做到满足电机供电需求的前提下使光伏阵列数量最小化。

5) 储能方式以储水替代蓄电。光伏水泵系统的储能环节中的蓄电池价格昂贵,使用寿命为2~3年。以蓄电池为储能方式的系统成本较高,不利于光伏水泵系统的广泛使用。将蓄电改为储水,以水的势能替代电能被储存下来,该储能方式大大降低了光伏水泵系统的成本,储能效果良好。

#### 5.2 光伏水泵系统的研发方向

光伏水泵系统研发方向应该考虑以下5个方面:

1) 随着中小型光伏水泵系统的快速发展,在优化电池板功率的基础上应加大对系统运行可靠性的评价,以提高光伏水泵系统长期运行的可靠性和供水的稳定性,保证光伏水泵产业的健康、稳定发展。

2) 继续对控制算法进行研究,开发出控制精度高、稳定性性能好同时控制简单、响应快速且容易实现的最大功率点跟踪算法。组合型MPPT控制算法将是今后MPPT控制策略改进的新方向。

3) 开发高效的驱动电机,提高电机工作效率的同时,保障光伏阵列转换能量的充分利用。

4) 研发高效的光伏专用水泵,打破当前光伏水泵行业无专用水泵的尴尬局面,解决市售普通水泵与光伏水泵系统容量很难匹配的难题。

5) 研发低成本、高可靠性的智能控制器以提高各组件间的性能匹配及应对多变的气候状况的能力,继而提高系统动态品质和全局效率。

#### 参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [2] 盛锋, 滕国荣, 严建华, 等. 太阳能光伏水泵在农业方面的应用[J]. 农机化研究, 2008(12): 198-200.  
Sheng Jiang, Teng Guorong, Yan Jianhua, et al. Analysis for application on agriculture of solar PV pumping [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(12): 198-200.
- [3] 刘厚林, 袁寿其, 施卫东, 等. 光伏水泵系统及其应用前景[J]. 水泵技术, 2002(2): 42-45.  
Liu Houlin, Yuan Shouqi, Shi Weidong, et al. Photovoltaic pump system and its application prospect [J]. Pump Technology, 2002(2): 42-45.

- [4] 刘旭帅, 王燕. 光伏水泵应用优势的研究[J]. 才智, 2011(1): 72.  
Liu Xushuai, Wang Yan. Photovoltaic pump application advantages of research [J]. Intelligence, 2011(1):72.
- [5] Mohammad, Al-Smairan. Application of photovoltaic array for pumping water as an alternative to diesel engines in Jordan Badia, Tall Hassan station: Case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012 (16): 4500- 4507.
- [6] 邓波, 陈坚, 罗红英, 等. 光伏提水技术研究与应用[J]. 中国水利, 2011(16): 20-23.  
Deng Bo, Chen Jian, Luo Hongying, et al. Research and application of photovoltaic water-lifting technology[J]. China Water Resources, 2011 (16): 20-23.
- [7] 孙秀立, 杨国良. 光伏水泵的利用[J]. 科技致富向导, 2011(3): 307.  
Sun Xiuli, Yang Guoliang. The application of photovoltaic pump[J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2011(3): 307.
- [8] 查咏, 吴永忠, 刘慧敏. 光伏提水灌溉的技术和经济学初步分析[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(4B): 146-147.  
Zha Yong, Wu Yongzhong, Liu Huimin. The preliminary analysis of technology and economy on photovoltaic water pumping irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(4B): 146-147.
- [9] Ramos J S, Ramos H M. Solar powered pumps to supply water for rural or isolated zones: A case study [J]. Energy for Sustainable Development, 2009, 13(3): 151-158.
- [10] Posorski R. Photovoltaic water pumps, an attractive tool for rural drinking water supply [J]. Solar Energy, 1996, 58(4-6): 155-163.
- [11] 魏海峰, 李萍萍, 包晓明. 基于同步整流的光伏水泵数字控制器[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 94-98.  
Wei Haifeng, Li Pingping, Bao Xiaoming. Digital controller for PV pumping based on synchronous rectification[J]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 94-98.
- [12] 王侃宏, 王丽辉, 崔坚, 等. CDM在太阳能光伏发电产业中的应用研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(4): 44-48.  
Wang Kanhong, Wang Lihui, Cui Jian, et al. Study on the application of CDM in solar photovoltaic generation industry[J]. Building Science, 2008, 24(4): 44-48.
- [13] 李忠贤. 太阳能电池研究现状[J]. 信息记录材料, 2013, 14(3): 58-61.  
Li Zhongxian. The research status of the solar cell[J]. Information Recording Materials, 2013, 14(3): 58-61.
- [14] Hamidat A, Benyoucef B, Hartani T. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions [J]. Renewable Energy, 2003, 28(3): 1081-1096.
- [15] Kala M, Sadrul U, Steven B. Solar photovoltaic water pumping-opportunities and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(4): 1162-1175.
- [16] Abdolzadeh M, Ameri M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells[J]. Renewable Energy, 2009, 3(34): 91-96.
- [17] 刘翼, 荆龙, 童亦斌. 基于 Simulink 的光伏电池组件建模和 MPPT 仿真研究[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 94-97.  
Liu Yi, Jing Long, Tong Yibin. Study of PV module and MPPT control based on Simulink[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(18): 94-97.
- [18] 鞠洪新, 余世杰, 苏建徽, 等. 基于空间矢量 PWM 法的光伏水泵变频控制系统[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 157-161.  
Ju Hongxin, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. The pwm inverter based on space vector of PV water pumping system [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2005, 26(2): 157-161.
- [19] 张新亮. 基于恒定电压优化的光伏系统 MPPT 控制方法[J]. 电子设计工程, 2013, 21(10): 112-115.  
Zhang Xinliang. MPPT control based on improved constant-voltages method for photovoltaic system[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(10): 112-115.
- [20] 丛进, 莫岳平, 张丽丽, 等. 基于 DSP 小型光伏水泵控制系统研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 17-19.  
Cong Jin, Mo Yueping, Zhang Lili, et al. Research of low power photovoltaic water pumping control system based on DSP[J]. Power Electronics, 2010, 44(10): 17-19.
- [21] 黄礼明, 连永圣, 陈标龙, 等. 基于扰动观察法的 MPPT 控制优化策略[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 206-208.  
Huang Liming, Lian Yongsheng, Chen Biaolong, et al. Optimized MPPT control strategy based on perturbation and observation method [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(24): 206-208.
- [22] 邵龙, 刘观起, 胡婷. 光伏发电系统最大功率点跟踪方法研究综述 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 80-85.  
Shao Long, Liu Guanqi, Hu Ting. Review of maximum power point tracking techniques for photovoltaic power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 80-85.
- [23] 胥芳, 张任, 吴乐彬, 等. 自适应 BP 神经网络在光伏 MPPT 中的应用 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 468-472.  
Xu Fang, Zhang Ren, Wu Lebin, et al. Self-adaption BP neural network for the maximum-power-point tracking in photovoltaic[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(3): 468-472.
- [24] 崔岩, 王丽霞. 基于神经网络应用的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 系统仿真技术, 2009, 5(4): 241-246.  
Cui Yan, Wang Lixia. Based on application of neural networks photovoltaic-array maximum power-point tracking [J]. System Simulation Technology, 2009, 5(4): 241-246.
- [25] 刘观起, 游晓科, 杨玉新, 等. 光伏发电系统最大功率点跟踪方法研究综述[J]. 陕西电力, 2012(2): 18-22.  
Liu Guanqi, You Xiaoke, Yang Yuxin, et al. Study on maximum power point generation system[J]. Shanxi Electric Power, 2012(2): 18-22.
- [26] 谢子青. 模糊控制在光伏水泵灌溉系统中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 34(8): 180-182.  
Xie Ziqing. Application of fuzzy control in photovoltaic irrigation system [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(8): 180-182.
- [27] 黄克亚, 尤凤翔, 李文石. 模糊神经网络在光伏发电 MPPT 中的应用 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 300-304.  
Huang Keqing, You Fengxiang, Li Wenshi. Application of fuzzy neural networks in MPPT of photovoltaic power generating system[J]. Computer Simulation, 2012, 29(8): 300-304.
- [28] 刘洋, 苏建徽, 罗皓泽, 等. 基于最优梯度 MPPT 控制的光伏水泵系统[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 20-21.  
Liu Yang, Su Jianhui, Luo Haoze, et al. MPPT control based on optimal gradient method of PV pump system[J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 20-21.
- [29] 刘琳, 陶顺, 郑建辉, 等. 基于最优梯度的滞环比较光伏最大功率点跟踪算法[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 56-61.  
Liu Lin, Tao Shun, Zheng Jianhui, et al. Improved maximum power point tracking algorithm for photovoltaic generation based on combination of hysteresis comparison with optimal gradient[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 56-61.
- [30] 赵庚申, 王庆章, 许盛之. 最大功率点跟踪原理及实现方法的研究

- [J]. 太阳能学报, 2006, 27(10): 997-1001.
- Zhao Gengshen, Wang Qingzhang, Xu Shengzhi. Research on realization means and principle of maximum power point tracing [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(10): 997-1001.
- [31] 司传涛, 周林, 张有玉, 等. 光伏阵列输出特性与MPPT控制仿真研究[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 284-288.
- Si Chuantao, Zhou Lin, Zhang Youyu, et al. Simulation research on output characteristics of photovoltaic array and MPPT control [J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 284-288.
- [32] Zegaoui A, Aillerie M, Petit P, et al. Comparison of two common maximum power point trackers by simulating of PV generators[J]. Energy Procedia, 2011(6): 678-687.
- [33] 李晶, 窦伟, 徐正国, 等. 光伏发电系统中最大功率点跟踪算法的研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(3): 268-273.
- Li Jing, Dou Wei, Xu Zhengguo, et al. Research on MPPT methods of photovoltaic power generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(3): 268-273.
- [34] 赖东升, 杨苹. 一种应用于光伏发电 MPPT 的变步长电导增量法[J]. 电力电子技术, 2012, 46(3): 40-42.
- Lai Dongsheng, Yang Ping. Variable step-size incremental conductance used in maximum power point tracking control of PV power system[J]. Power Electronics, 2012, 46(3): 40-42.
- [35] 冯涛, 陈华. 光伏发电系统中改进型 MPPT 控制技术研究[J]. 自动化应用, 2011(8): 81-84.
- Feng Tao, Chen Hua. Research on improved MPPT control technology used in photovoltaic power generation system[J]. Automation Application, 2011(8): 81-84.
- [36] 黄克亚, 尤凤翔, 李文石. 组合模糊控制技术与扰动观察法提升光伏发电 MPPT 性能[J]. 测控技术, 2012, 31(7): 130-134.
- Huang Keya, You Fengxiang, Li Wenshi. Combination of fuzzy logic control with perturbation & observation used to improve the MPPT performance of photovoltaic system[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(7): 130-134.
- [37] 褚新惠, 官洪运, 单一帆, 等. 基于 DSP 的无刷直流电机调速系统[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2-3): 175-177.
- Chu Xinhui, Guan Hongyun, Shan Yifan, et al. Brushless DC motor velocity adjustment system based on DSP[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(2-3): 175-177.
- [38] 丛进, 莫岳平, 张丽丽. 光伏水泵系统中无刷直流电机的控制研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(8): 10-12.
- Cong Jin, Mo Yueping, Zhang Lili. Research on brushless DC motor control in photovoltaic water pumping system[J]. Power Electronics, 2010, 44(8): 10-12.
- [39] 江东流, 莫岳平, 黄海田. SVPWM 方法在光伏水泵控制系统中的应用[J]. 电工电气, 2012(8): 39-42.
- Jiang Dongliu, Mo Yueping, Huang Haitian. Application of space vector pulse width modulation method in photovoltaic water pump control system [J]. Electrotechnics Electric, 2012(8):39-42.
- [40] 盛男, 苏建徽, 张国荣. 光伏水泵系统 SVPWM 控制的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(4): 82-84.
- Sheng Nan, Su Jianhui, Zhang Guorong. Research of photovoltaic water pumping system based on SVPWM control[J]. Power Electronics, 2010, 44(4): 82-84.
- [41] 潘俊杰, 申今生. 永磁同步电机在自来水厂的应用[J]. 城镇供水, 2011(9): 51-53.
- Pan Junjie, Shen Jinsheng. The application of permanent magnet synchronous motor in the waterworks[J]. Urban Water Supply, 2011 (9): 51-53.
- [42] 谈明高, 崔建保, 刘厚林, 等. 太阳能水泵系统的研究现状与趋势[J]. 流体机械, 2013, 41(7): 33-39.
- Tan Minggao, Cui Jianbao, Liu Houlin, et al. Research status and development trends of solar powered water pumps[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(7): 33-39.
- [43] 陈万青, 王尽孝. 基于泵内特性的离心式水泵建模仿真及可视化研究[J]. 黑河学院学报, 2011, 2(1): 124-128.
- Chen Wanqing, Wang Jinxiao. Modeling and simulation and visualization of centrifugal type driven water pump based on interior characteristics[J]. Journal of Heihe University, 2011, 2(1): 124-128.
- [44] 陆伟刚, 张旭. 特低扬程竖井贯流泵装置水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 103-106.
- Lu Weigang, Zhang Xu. Research on model test of hydraulic characteristics for super-low head shaft-well tubular pump unit[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 103-106.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



## 尚勇出席第31届国际无线电科学(联盟)大会

2014年8月17日,由工业和信息化部、中国科学技术协会、北京市人民政府指导、支持,国际无线电科学联盟主办,中国电子学会承办的第31届国际无线电科学(联盟)大会在北京开幕。工业和信息化部部长苗圩、中国科协党组书记尚勇、国际无线电科学联盟主席 Phil Wilkinson、国际科学理事会执委 Orhan Altan、国际无线电科学联盟秘书长 Paul Lagasse 出席开幕式并致辞,中国电子学会理事长、陕西省省长娄勤俭主持开幕式。

在为期7天的会议中,来自全球各地的约1200余名无线电相关领域的科学家、学者、专家围绕电磁计量、场与波、无线电通信系统与信号处理、电子学和光子学、电磁噪声与干扰、波传播与遥感、电离层无线电与传播、等离子体波、射电天文学、生物医学电磁学等专业领域展开深入交流和探讨。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15847110.html>。