

智能光伏海水淡化系统的研究与开发

陈 明¹, 徐 政¹, 陈锐坚²

(1. 清华大学深圳研究生院电力系统国家重点实验室深圳研究室, 深圳 518055; 2. 深圳天源新能源股份有限公司, 深圳 518055)

摘 要: 为推广海水淡化技术的应用、就地解决偏远海岛的淡水供应问题,研究智能光伏反渗透海水淡化控制技术,开发双输出逆变控制器,实现根据太阳辐照度的系统启停和运行模式切换、通过水泵调速控制实施最大功率点跟踪,集成基于进/出水导电率/压力及液位监测的运行状态判断和故障保护功能,并将柴油发电机等作为后备电源,以保证连续阴雨天气时的淡水供应。小型样机系统的实验表明,配置3.6 kW光伏阵列能保证晴天条件下日产1 t淡水,并具有全自动运行可靠、设备维护措施全等特点,尤其适宜在无电和缺乏技术人员的地区推广应用。

关键词: 太阳能发电; 反渗透; 海水淡化; 全自动运行; 智能控制; 双输出逆变器; 最大功率点跟踪

中图分类号: TM615

文献标识码: A

0 引 言

海水淡化已成为解决全球水资源危机的重要途径。反渗透膜法具有投资少、能耗低、建设快、模块化等优点,是海水淡化研究的主要发展方向。光伏反渗透海水淡化(photovoltaic reverse osmosis desalination, PVRO)系统将光伏发电技术与反渗透海水淡化技术相结合,为无电或缺电的偏远地区提供了经济可靠的应用方案。为消除气象、日照等不稳定因素对产水量的不利影响,系统通常配有蓄电池^[1,2],但大容量的蓄电池组及充放电控制器不仅会增加设备成本,其日常管理、更换与后处理也会大幅增加运行成本。因此,一些学者对无蓄电池PVRO系统的技术及经济可行性进行仿真分析和实验验证^[3-5],本实验室对PVRO关键控制技术研究^[6]。

在小型PVRO系统的推广应用中,为保证制水质量和反渗透膜与过滤器的使用寿命、降低对运行管理人员的专业技术要求,研究和开发智能化控制、傻瓜式操作的PVRO系统尤为重要。本文针对一套小型反渗透海水淡化系统,研究以光伏阵列电源、无蓄电池储能的全自动智能控制方案,开发控制系统,可实现系统运行、状态监测和故障保护

的全自动化。实验结果表明:整套系统运行稳定,最大功率点跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)精度高,运行模式切换准确,故障保护设定合理,可为系列产品的开发和推广应用奠定基础。

1 小型反渗透海水淡化系统

图1为一套小型反渗透海水淡化系统,采用常规电源连续运行的标称产水能力为3 t/d,其规格参数如表1所示。所有设备(包括2台离心泵和1台柱塞泵、1套砂滤装置和2组保安过滤器、1组反渗透装置、1个淡水冲洗水箱、4个电控阀、1个手动调压阀、3个水压表等)被集成安装在1个金属构架上,生产厂商整机出货,安装占地面积小于0.6 m²。现场安装方便,只需准备淡水水箱,接通电源、提水泵进水管和浓盐水排放管。

制水运行包括提水、预处理、反渗透、储水和排放等过程。由提水泵采集的原水经砂滤器和保安过滤器预处理后,由高压泵加压进入反渗透装置,淡水透过反渗透膜被注入淡水冲洗水箱和淡水水箱,而浓盐水则经过手动调压阀排出。尽管从高压浓盐水中回收能量能显著降低系统的能耗^[7],但由于其设备工艺复杂、价格昂贵,很少将其应用在小

型反渗透海水淡化系统中。另外,反渗透膜在长时间使用后会表面结垢、微生物滋长等问题,因此需定期清洗,以保障性能、延长寿命。设定每天制水完成后用水箱中的淡水进行一次冲洗,由于系统较小,无需进行化学清洗。

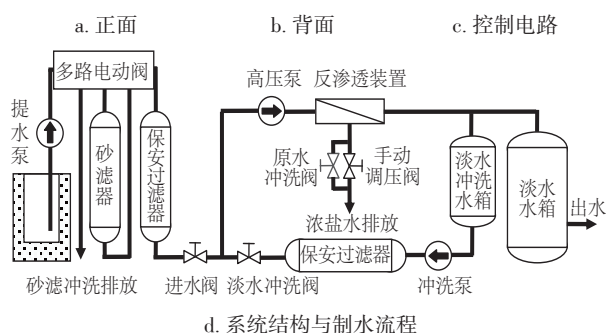
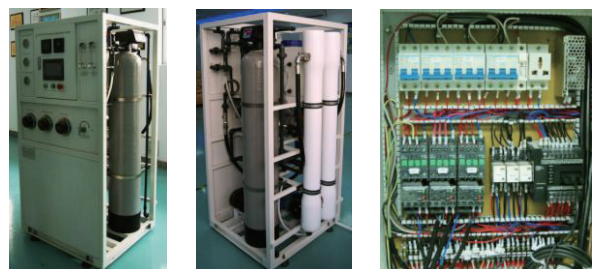


图1 小型反渗透海水淡化系统

Fig. 1 Small-scale reverse osmosis desalination system

表1 关键设备规格参数

Table 1 Specifications of key devices

组件	型号	规格
提水离心泵	CHLF2-30	2.0 t/h, 三相 220 V/370 W
高压柱塞泵	APP0.6	0.6 t/h, 三相 220 V/1500 W
冲洗离心泵	CHL2-30	2.0 t/h, 三相 220 V/370 W
反渗透装置	SW30-2540	2 支串联

采用常规电源时的系统运行管理需人工操作,通过正面的水压表及手动调压阀进行系统设定,操作触摸屏和按钮控制启停与切换运行模式,由可编程逻辑控制器控制对应的继电器和电控阀。但当以光伏阵列供电时,由于光伏功率的波动与变化,人工操作无法保证系统的高效稳定运行,故需配套全自动智能控制。

2 智能控制系统的开发

2.1 硬件电路设计

本文针对上述小型反渗透海水淡化系统,开发

专用逆变控制器,采用光伏阵列供电,实现系统的智能控制和全自动运行,设计产水能力为 1 t/d。主电路采用双输出逆变电路结构,每路三相变频输出的设计规格为 220 V/1500 W,由 1 块内置 2 个电机调速控制脉宽调制模块的 32 位单片机驱动两个智能功率模块,开关频率 5~15 kHz 可调,根据 3 台水泵不同的运行特性,实施基于 MPPT 控制策略的协调调速控制。在此基础上,重新设计控制电路,追加以下功能:

1) 水泵选择切换功能:需要控制 3 台水泵,其中提水泵和清洗泵不会同时工作,因此采用 1 个三刀双掷继电器进行两者之间的切换。

2) 电控阀控制功能:由单片机通过继电器控制电控阀,切换管路,实现不同运行模式的转换。

3) 辅助电源功能:在主电力板上增加开关电源电路,为电控阀、继电器等提供工作电源。

4) 运行状态监控功能:通过 8 路传感器,监测原水和淡水的电导率、水压及液位等,作为运行模式切换和故障保护等的依据。

5) 电源切换功能:预留常规电源(电网或柴油发电机等)接入端口和继电器切换电路,保证连续阴雨天时的淡水供应。

图 2 为新开发的双输出调速逆变控制器,完全取代原有的控制电路,嵌装在原位,实现所有控制功能。

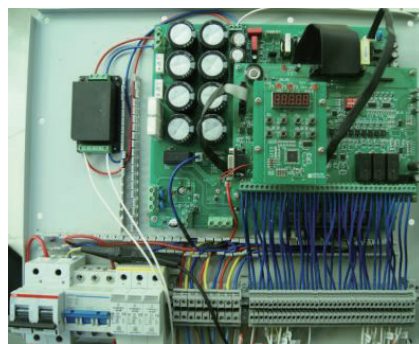


图2 双输出逆变器样机

Fig. 2 Prototype of dual-output inverter

2.2 控制程序设计

全自动智能控制有 2 个主要组成部分:基于 MPPT 策略的水泵变频调速控制与基于系统状态切换运行模式的逻辑控制。水泵变频调速控制

的输出频率随太阳辐照度而变化,对应的输出电压采用变压变频调制方法,根据水泵运行特性的差异,提水与冲洗离心泵选用二次 V/f 曲线,以提高电机的运行效率;而高压柱塞泵选用线性 V/f 曲线,以保证电机的输出转矩。逻辑控制则根据光照条件和各传感器的反馈,判断系统的运行状态,确定运行模式,具体设计为:待机模式、启动与制水模式、膜冲洗模式、砂滤清洗模式和故障处理模式。

由光伏阵列供电时,每天天亮后,工作电源启动,控制软件开始运行,系统进入全自动运行状态;天黑后,工作电源停止,控制软件结束运行。总体控制流程如图 3 所示,具体过程如下:

1) 待机模式:控制电路上电运行,检测光伏阵列输出电压 V_{PV} ,当其超过设定的阈值 V_{Istart} 时,表明太阳辐照度已达到启动系统运行的强度,切换至启动与制水模式。

2) 启动与制水模式:系统运行核心部分,大部分时间处于此模式。具体操作:首先打开进水阀,20 s 后启动并加速提水泵;当其能以额定转速稳定运行时,打开原水冲洗阀并延时 15 s;当光伏阵列输出电压超过设定的阈值 V_{2start} 时,启动高压泵,对反渗透膜进行 1 min 原水冲洗;然后关闭原水冲洗阀,进入正常制水状态,提水泵保持额定转速运行,高压泵 MPPT 调速运行;监测系统状态,出现异常时采取相应的保护措施;当光照变弱,导致高压泵不能正常运行的时间 t_{stop} 超过设定值 T_1 时,准备结束当天的运行,切换至膜冲洗模式。

3) 膜冲洗模式:每次停止制水运行后,需用淡水冲洗水箱中的淡水冲洗反渗透膜,以保障其性能,延长使用寿命。当淡水水箱的液位升至上限时,系统也停止制水运行,进行反渗透膜冲洗。具体操作为:首先关停高压泵和提水泵,3 s 后关闭进水阀、打开淡水冲洗阀和原水冲洗阀,20 s 后启动淡水冲洗阀并加速至额定转速;淡水冲洗水箱的液位降至下限时,关停淡水冲洗泵,关闭淡水冲洗阀,切换至砂滤清洗模式。

4) 砂滤冲洗模式:为保证砂滤器的过滤效果,每次反渗透膜冲洗后,对砂滤器进行 1 次冲洗。具体操作:通过砂滤器上的多路电动阀,接通反向冲

洗管路,20 s 后启动提水泵并加速至额定转速,用原水反向冲洗,直接排出;5 min 后接通正向冲洗管路,用原水正向冲洗 5 min 后关停提水泵,软件停止运行,等待天黑关机。

5) 故障处理模式:在各运行模式中,当检测信号显示有异常情况,切入故障处理模式,关停所有水泵,关闭所有电控阀,判断故障类型,记录故障信息,并向用户报警和提示,待故障排除后方可继续运行。常见的故障状态可能有:反渗透膜堵塞造成的工作压力过高、反渗透膜破损导致淡水电导率过高、水泵堵转、进水压力过低等。

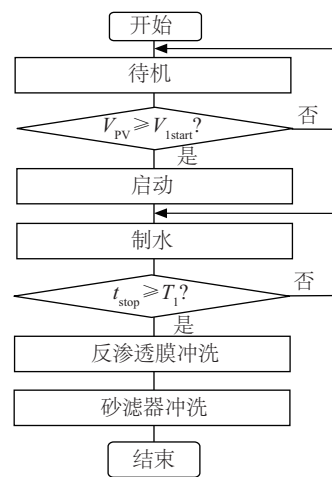


图3 光伏海水淡化控制程序流程图

Fig. 3 Flow chart of PVRO control program

2.3 调压方法优化设计

光伏反渗透海水淡化系统制水运行时,高压泵的转速随太阳辐照度而变化。若手动调压阀固定不动,工作压力、产水率及能耗均会大幅变动。表 2 为高压泵以不同转速运行时的实测结果。鉴于海水的平均盐度为 3.47%,而江河入海口海域的盐度相对较低,故采用盐度分别为 2.4% 和 3.4% 的实验原水。结果表明:系统工作压力和功耗与高压泵转速呈近似线性比例关系。由于无能量回收装置,吨水能耗较高,并随高压泵转速的降低,产水量迅速减小,吨水能耗急剧上升。原水盐度和工作压力影响制水质量。工作压力为 5 MPa 时,2 种盐度原水淡化后的淡水电导率分别为 123 和 307 S/cm,水质良好;随着工作压力的降低,淡化效果变差,淡水电导率上升。

表2 定调压阀开度的运行特性

Table 2 Operating characteristics with a fixed opening degree of pressure regulating valve

原水盐度/%	高压泵频率/Hz	工作压力/MPa	系统功率/kW	淡水产水量/t·h ⁻¹	淡水电导率/S·cm ⁻¹	吨水能耗/kWh·t ⁻¹
2.4	50	5.0	1.78	0.226	123	7.90
	45	4.4	1.49	0.166	142	8.97
	40	3.8	1.25	0.131	172	9.53
	35	3.4	1.03	0.095	238	10.84
	30	2.9	0.85	0.065	315	13.09
	25	2.3	0.70	0.028	558	24.70
3.4	50	5	1.70	0.147	307	11.52
	45	4.2	1.43	0.118	353	12.12
	40	3.8	1.20	0.084	466	14.32
	35	3.4	1.00	0.049	697	20.56
	30	2.9	0.83	0.025	1307	33.55

表3为恒定工作压力下的系统实测运行特性,即通过调节调压阀的开度,使高压泵以不同转速运行时的工作压力保持为5 MPa不变。结果表明:随着高压泵转速的降低,系统功耗、淡水产水量及吨水能耗均有所减小,但变化幅度较小。

表3 定工作压力(5 MPa)的运行特性

Table 3 Operating characteristics with constant working pressure (5 MPa)

原水盐度/%	高压泵频率/Hz	系统功率/kW	淡水产水量/t·h ⁻¹	吨水能耗/kWh·t ⁻¹
2.4	50	1.76	0.217	8.09
	45	1.64	0.200	8.19
	40	1.47	0.190	7.74
	35	1.31	0.183	7.16
	30	1.16	0.168	6.92
	25	1.07	0.157	6.79
3.4	50	1.75	0.149	11.70
	45	1.60	0.145	10.97
	40	1.47	0.148	9.94
	35	1.31	0.139	9.46
	30	1.16	0.127	9.15
	25	1.06	0.122	8.71

在相同功耗条件下,恒定工作压力控制的产水量远高于定调压阀开度的产水量,但系统有效运行的最低功率略高。本文提出一种优化调压方法,采

用电动调压阀,光照强时保持5 MPa工作压力,光照弱时适当调低工作压力,最低至3 MPa,既提高产水量,又保证光伏阵列的利用率。图4为2种调压方法下的产水量比较。

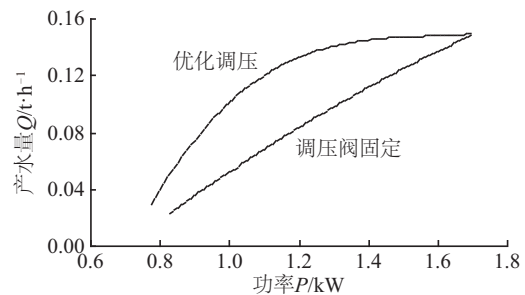


图4 不同调压方法下的淡水产水量(原水盐度3.4‰)
Fig. 4 Fresh water production with different working pressure control ($S=3.4\%$)

3 光伏阵列配置优化设计

光伏海水淡化系统的产水能力取决于所配置光伏阵列的大小。在年平均日太阳总辐射量为 $5.5\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 地区,标称峰值功率分别为 2.2 kW 和 3.3 kW 光伏阵列的最大功率变化特性可近似为图5所示的曲线^[6],图中两条横向虚线分别表示光伏海水淡化系统的最大和最小运行功率。由表2可知,本文的海水淡化系统 $P_{\text{max}}\approx 1.7\text{ kW}$, $P_{\text{min}}\approx 0.8\text{ kW}$ 。当配置 2.2 kW 光伏阵列时,系统的有效运行时间($t_2\sim t_3$)短,光伏阵列的发电效率高;当配置 3.3 kW 光伏阵列时,系统的有效运行时间($t_1\sim t_4$)长,但受

P_{\max} 的限制,光伏阵列未能得到充分利用。

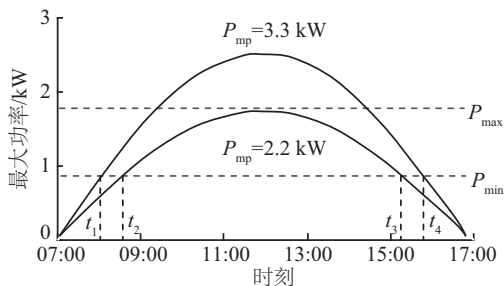


图5 光伏阵列最大功率变化曲线
Fig. 5 Maximum power curves of PV arrays

基于图 4、表 2 和表 3 可推算出日产水量,如表 4 所示。不同调压方式的影响明显,尤其在多云或阴天时,日产水量的差异更大。另外,日产水量与 P_{peak} 并不保持同比例增长,随着光伏阵列标称峰值功率的不断增加,日产水量的增幅逐渐变小,表明系统配置存在 1 个最佳性价比点。为了满足日淡水产水量 1 t 的设计要求,对于低盐度的海水,可选配 2.2 kW 光伏阵列,而对于标准盐度的海水,应选配 3.3 kW 光伏阵列,并由此得到简单实用的优化配置设计系数:

$$m = \frac{P_{\text{peak}}}{P_{\text{max}}} \approx 2$$

表 4 日淡水产水量估算

Table 4 Estimation of daily fresh water production			
原水 盐度/%	光伏 阵列/kW	日产水量/t·d ⁻¹	
		调压阀固定	优化调压
2.4	2.2	1.05	1.27
	3.3	1.58	1.69
3.4	2.2	0.75	0.93
	3.3	1.04	1.14

4 实验结果

4.1 MPPT 控制特性测试

使用具有光伏阵列模拟功能的可编程直流电源,设定不同的 I - V 曲线,确认 MPPT 控制特性。原水盐度为 3.4%,手动调压阀固定。表 5 所示的实测结果表明,高压泵运行频率、电源输出功率及产水量均随光伏模拟电源最大功率设定值的增大而增大,MPPT 精度高,只有当模拟电源最大功率设定值超过系统的最大运行功率时,MPPT 精度有所下降。

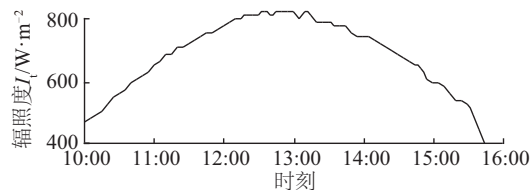
表 5 最大功率点跟踪控制实验结果

Table 5 Experimental results of MPPT control				
最大 功率/W	高压泵 频率/Hz	输出 功率/W	产水量/ t·h ⁻¹	MPPT 精度/%
1900	50.0	1709	0.155	89.8
1700	49.5	1675	0.145	98.4
1500	46.8	1497	0.126	99.6
1300	43.4	1288	0.107	98.9
1100	39.7	1100	0.086	99.8

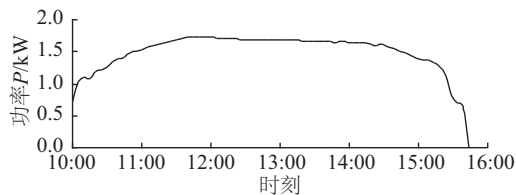
4.2 系统运行实验

功能测试:先采用直流稳压电源供电,对系统正常工作流程以及系统在各运行模式中突然掉电时的系统响应进行测试。结果表明设计功能全部正常。

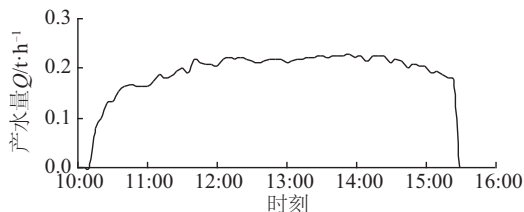
系统运行:以光伏阵列作为系统的电源,检测系统的全自动运行过程。首先进行原水盐度 2.4% 的系统实验,采用 11 块标称峰值功率为 250 W 的多晶硅光伏组件,总峰值功率 2.75 kW,为系统最大运行功率的 1.62 倍。图 6 为晴天条件下的全天运行状态。



a. 入射太阳辐射度



b. 光伏阵列输出功率



c. 淡水产水量

图6 晴天实验结果(原水盐度 2.4%)

Fig. 6 Experimental results on a sunny day ($S=2.4\%$)

由于周围树木的遮挡,天亮后系统处于待机状态,直到 10:00 光伏阵列的入射太阳辐照度升至 470 W/m^2 ,系统开始运行,原水冲洗反渗透膜、制淡水注满淡水冲洗水箱后,开始计量产水量;随着光照的增强,高压泵不断加速,11:45 达到最高转速并一直保持到 14:20;随后高压泵转速逐渐下降,15:30 由于前方建筑的遮挡,光伏阵列输出功率大幅降低,高压泵停转,进行膜冲洗和砂滤冲洗后,进入待机状态。全天系统运行稳定,状态曲线平滑,未出现停机重启,产淡水 1.05 t 。

在原水盐度 3.4% 的系统实验中,采用 40 块标称峰值功率为 90 W 的非晶硅薄膜光伏组件,总峰值功率 3.6 kW ,约为系统最大运行功率的 2 倍。图 7 为多云天气条件下的实验结果,系统运行时间 09:00~15:00,能及时响应太阳辐照度的变化,运行状态波动大,并有数次因光照太弱而暂停运行的现象,全天累计产淡水 0.63 t 。晴天条件下,日产水量能达到 1 t 的设计目标。

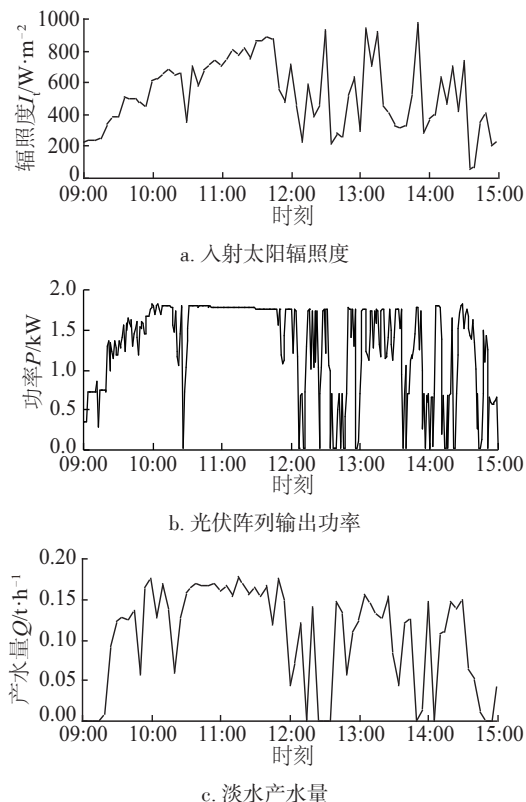


图7 多云天实验结果(原水盐度 3.4%)

Fig. 7 Experimental results on a cloudy day ($S=3.4\%$)

5 结 论

研发的智能控制系统实现了光伏反渗透海水

淡化系统全自动、高效和稳定运行,合理的冲洗功能保证了制水质量和设备使用寿命。通过样机测试和系统实验,得到以下主要结论:

1) 反渗透海水淡化系统在 $(0.5 \sim 1.0)P_{\max}$ 的功率范围内均能有效运行,适宜与光伏阵列相结合。

2) 原水盐度和系统工作压力影响制水质量。正常运行时,淡水电导率约为 300 S/cm ;随着工作压力的减小,淡水电导率最高可增大至 1300 S/cm ,但由于对应的产水量很小,不会导致淡水水箱内整体的电导率超标。

3) 对于无能量回收的系统,通过对浓盐水排放阀的优化调压控制能提高约 10% 的产水量。

4) 光伏阵列的优化配置功率约为系统最大运行功率的 2 倍,晴天条件下的日产水量约为使用常规电源 24 h 连续运行的 $1/3$ 。

[参考文献]

- [1] Baharudin N H, Mansur T M N T, Ali R, et al. Optimization design and economic analysis of solar power system with sea water desalination for remote areas [A]. 2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering[C], Penang, Malaysia, 2011.
- [2] Ramkiran B. Solar powered reverse osmosis - A solution for energy and water crisis [A]. International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems[C], Coimbatore, India, 2015.
- [3] Bilton A M, Kelley L C, Dubowsky S. Photovoltaic reverse osmosis- Feasibility and a pathway to develop technology [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 31(1): 24—34.
- [4] Thomson M, Infield D. A photovoltaic-powered seawater reverse osmosis system without batteries [J]. Desalination, 2003, 153(1): 1—8.
- [5] De Carvalho P C M, Pontes R S T, Oliveira D S Jr, et al. Control method of a photovoltaic powered reverse osmosis plant without batteries based on maximum power point tracking [A]. 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America [C], Sao Paulo, Brazil, 2004.
- [6] 徐 政, 曾丕江, 章 飞, 等. 光伏反渗透海水淡化系统的研究与开发 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(4): 886—892.
- [6] Xu Zheng, Zeng Pijiang, Zhang Fei, et al. Research and development of PV reverse osmosis desalination systems [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(4):

- 886—892.
- [7] 潘献辉, 王生辉, 杨守志, 等. 反渗透海水淡化能量回收技术的发展及应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 16—19.
- [7] Pan Xianhui, Wang Shenghui, Yang Shouzhi, et al. Development and use of energy recovery technology in reverse osmosis seawater desalination[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 16—19.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INTELLIGENT PHOTOVOLTAIC REVERSE OSMOSIS DESALINATION SYSTEMS

Chen Ming¹, Xu Zheng¹, Chen Ruijian²

(1. National Key Laboratory of Power Systems in Shenzhen, Graduate School of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518055, China;
2. Shenzhen Solartech Renewable Energy Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to extend the application of seawater desalination technology and provide a local solution of fresh water supply applicable to remote islands, an intelligent control technology and a dual-output inverter for photovoltaic reverse osmosis desalination system are researched and developed in this paper. According to solar irradiance intensity, automatic start/stop of the system, operation mode shifting and maximum power point tracking through pump speed control are implemented. The functions of operating state identification and fault protection via monitoring the conductivities, the pressures of feed water and fresh water are integrated in the inverter. Besides, a backup diesel generator can be used to keep fresh water being supplied during continuous overcast or rainy days. The experimental results of a small prototype system demonstrate that a 3.6 kW PV array can ensure 1 m³ of daily freshwater production in sunny days. With the advantages including fully automatic reliable operation and well equipment maintenance measures, it is especially suitable for the wide applications pertinent to such areas without power grid and lack of technicians.

Keywords: solar power generation; reverse osmosis; desalination; automatic operation; intelligent control; dual-output inverter; MPPT