

光伏发电系统在大型水厂中的设计与实践

董 威

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘 要: 结合亦庄水厂项目工程特点和对现有光伏系统的分析对比,最终选择了并网型发电形式和薄膜型光伏组件。详细阐述了光伏发电系统的逆变器和并网点的电气设计,介绍了光伏发电系统中光伏阵列的防腐、结构设计和电气设备的选型、监测的安全保障措施。该系统 2018 年实际发电量为 $80.31 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,综合光伏发电系统衰减速率和实际运行经验等因素进行了能效分析预测,本次光伏发电系统年均发电量约为 $58.75 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年均 CO_2 减排量约为 478.22 t,年均 SO_2 减排量约为 6.53 t,年均 NO_x 减排量约为 6.81 t。证明了光伏发电系统在大型水厂的应用具有较好的发展前景。

关键词: 太阳能; 光伏发电; 能效分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)02-0059-06

Design and Practice of Photovoltaic Power Generation System in Large Water Plant

DONG Wei

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: Based on the project characteristics of Yizhuang Water Plant and the analysis and comparison of the existing photovoltaic system, the grid-connected power generation mode and thin film photovoltaic module were finally selected. The electrical design of the inverters and grid-connected points of the photovoltaic power generation system was described in detail. The anti-corrosion, structural design, selection of electrical equipment and safety measures for monitoring of the photovoltaic array in the photovoltaic power generation system were introduced. The actual power generation in 2018 was $803\ 100 \text{ kW} \cdot \text{h}$. The energy efficiency analysis and prediction were carried out based on factors such as attenuation rate and practical operation experience of photovoltaic power generation system. The average annual power generation of this photovoltaic power generation system was about $587\ 500 \text{ kW} \cdot \text{h}$, the average annual CO_2 emission reduction was about 478.22 tons, the average annual SO_2 emission reduction was about 6.53 tons, and the average annual NO_x emission reduction was about 6.81 tons. It was proved that the application of photovoltaic power generation system in large-scale water plants had good development prospects.

Key words: solar energy; photovoltaic power generation; efficiency analysis

我国是世界上太阳能资源比较丰富的国家,2/3 以上的国土面积年均日照时数超过 2 000 h,每年地表吸收的太阳能大约相当于 17 万亿吨标准煤能量,

开发前景非常广阔^[1]。根据美国 NASA 的气象数据:北京地区每年总辐射量约 $1\ 450 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,光伏发电系统设计软件 RETScreen 的气象数据:北京

地区每年总辐射量约 $1\,340\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, 适宜安装光伏发电系统。

北京市政府高度重视北京电力能源供应保障^[2],并大力提倡新能源的发展和应用,2009年北京市5部委联合下发的《北京市加快太阳能开发利用促进产业发展指导意见(京政发[2009]43号)》,指导意见中明确了北京市大力发展太阳能发电的决心。

为响应国家节能减排政策,同时结合给水厂有较大的土地闲置空间,北京亦庄水厂适宜安装光伏发电系统。笔者以北京亦庄水厂一期工程为背景,详细阐述光伏发电系统的设计过程,并对光伏发电系统进行了能耗分析。

1 工程概况

亦庄水厂一期工程设计规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 厂区主要生产构筑物分为水线及泥线两部分。

水线流程见图 1。泥线流程见图 2。

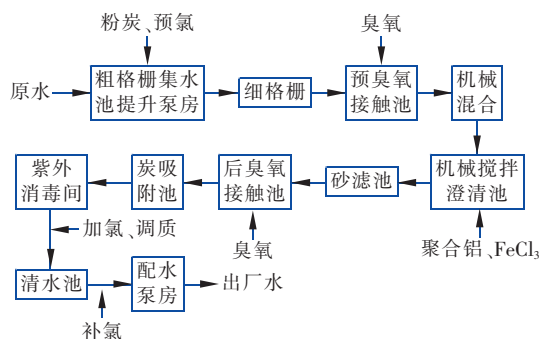


图 1 水线工艺流程

Fig. 1 Flow chart of water treatment process

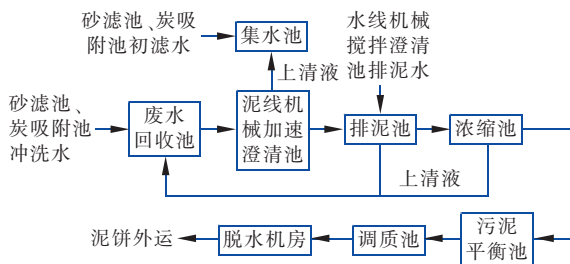


图2 泥线工艺流程

Fig. 2 Flow chart of sludge treatment process

亦庄水厂一期工程厂区占地约为 $16.28 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。其中,清水池占地面积为 $19\,840 \text{ m}^2$,占总工程面积的 12.19% 。

本工程主要建(构)筑物的具体占地面积如表 1 所示。

表 1 主要建(构)筑物占地面积

Tab. 1 Floor areas of main structures m^2

15:00 光伏组件阵列之间无阴影遮挡。

为防止阴影遮挡及考虑装机量最大化,综合考虑节约用地及发电收益,本工程采用 30° 倾角进行工程设计安装:采用最佳倾角设计,收益率最大化;此角度有益于光伏组件在下雨天自动清洁;此角度预留遮挡通道,方便以后组件清洗维护及检修。

太阳能电池方阵的方位角是光伏阵列的垂直面与正南方的夹角,向东设为负,向西设为正。本项目位于北京市,地处北半球,从场地条件出发,因项目建筑方向为正南,因此光伏阵列朝南正南设置。

2.4 光伏阵列支架选择

光伏阵列支架的类型有简单的固定支架和复杂跟踪系统。太阳跟踪装置的跟踪类型包括单轴跟踪、双轴跟踪和方位角跟踪^[5]。跟踪器是一种支撑光伏方阵的装置,它精确地移动以使太阳入射光线射到方阵表面上的入射角最小,这样太阳入射辐射(即收集到的太阳能)最大。由于跟踪系统的前期投入及后期运行维护费用较高,而本工程发电量相对较小,所以选用固定支架安装光伏电池组件。

2.5 光伏阵列现场布置

考虑水厂的景观与交通组织等因素,将清水池分隔成 3 个独立区域设置光伏阵列,其实际利用面积约 $9\,200\text{ m}^2$,实际安装光伏组件 4 176 块。清水池为地下封闭式,其上部为填埋土层,可将该土层地面做成硬化地面,即可用于光伏阵列的安装基础。同时在该硬化地面上设置导水通道,用于降水及日常维护时清洁用水的排放。

I 和 II 系列滤池车间东西两侧屋顶可为光伏发电系统提供的安装总面积约为 $2\,000\text{ m}^2$,实际安装光伏组件 960 块。

本次光伏组件实际安装合计 5 136 块,具体布置如图 3 所示。

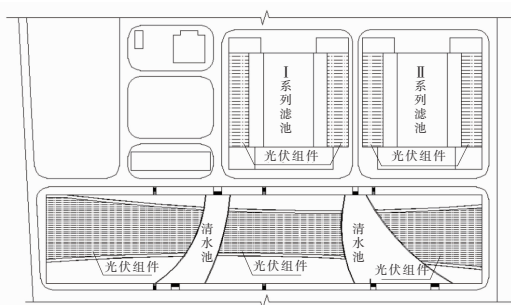


图 3 光伏阵列布置

Fig. 3 Photovoltaic array layout

2.6 光伏发电系统电气设计

并网型光伏发电系统由光伏组件、并网逆变器、交流配电柜以及控制单元等设备组成。

① 光伏发电系统阵列数学模型

单块光伏电池组件是由多个光伏电池单元经串、并联而成。

若电池组件中各光伏电池单元特性匹配,则在同一温度条件下,且受光均匀时,光伏电池组件的工程数学模型如下^[6]:

$$I_z = n_p I_{pc} - n_p I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{n_c k_c T n_s} V_z\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 I_z ——光伏电池组件输出电流

V_z ——光伏电池组件输出电压

n_s ——串联电池单元数目

n_p ——并联电池单元数目

令 $I_{ph} = n_p I_{pc}$, $\varepsilon = n_p I_0$ 与 $\delta = q/n_c k_c T n_s$, 则式(1)可简化为:

$$I_z = f(I_{ph}, V_z) = I_{ph} - \varepsilon \left[\exp(\delta V_z) - 1 \right] \quad (2)$$

式中 I_{ph} ——电池组件的等效光生电流

ε 、 δ ——在温度一定时都为常数

光伏电池组件的输出功率 P_z 可由下式得出:

$$P_z = V_z I_z \quad (3)$$

在光伏电池组件工作电压范围内分别对式(2)和式(3)中的 V_z 进行求导得:

$$\frac{dI_z}{dV_z} = -\varepsilon \delta \exp(\delta V_z) < 0 \quad (4)$$

$$\frac{dP_z}{dV_z} = I_z + V_z \frac{dI_z}{dV_z} \quad (5)$$

将式(1)和式(4)代入式(5)中,当 $dP_z/dV_z = 0$ 时,此时输出功率存在一个极值点 V_z 等于极值点电压 $V_{mpp,z}$,即可得:

$$(\delta V_{mpp,z} + 1) \exp(\delta V_{mpp,z}) = \frac{I_{ph}}{\varepsilon} + 1 \quad (6)$$

进一步在光伏电池组件工作电压范围内对式(5)中的 V_z 进行求导得:

$$\frac{d^2 P_z}{dV_z^2} = 2 \frac{dI_z}{dV_z} + V_z \frac{d^2 I_z}{dV_z^2} = -2\varepsilon \delta (2 + \delta V_z) \exp(\delta V_z) < 0 \quad (7)$$

由式(1)~(7)可知,光伏电池组件在其工作电压范围输出电流随着输出电压的升高而单调递减,电池组件的输出功率具有单峰值输出特性。其中式(4)表明,光伏电池组件外加电压高于其自身开路

电压或承受反向电压的情况下,呈负功率状态,所以实际工程中应避免光伏电池单元或光伏组件工作于负功率状态,否则可能发生热斑效应,进而损坏光伏电池材料^[1]。

本次光伏发电系统共计安装组件 5 136 块,结合数学模型计算和工程实际,计算出总装机容量为 603.48 kW_p。按区域设计采用 9 台 50 kW 逆变器,1 台 20 kW 逆变器,4 台 30 kW 逆变器。

② 逆变器系统设计

结合光伏布置场地面积、形状和光伏方阵组件连接方式等因素,设计出以下几种典型的逆变器系统:

a. 50 kW 逆变器系统

一套 50 kW 系统 9 块一串,53 路并联,共计 410~480 块 117.5 W_p 光伏组件不等,总容量约为 50 kW,接入 50 kW 逆变器直流输入端。此系统设计 9 套:清水池西侧 1#、2#、3#、4#四台逆变器,清水池中间 5#、6#和 7#三台逆变器,清水池东侧 8#和 9#两台逆变器。

b. 20 kW 逆变器系统

一套 20 kW 系统 9 块一串,18 路并联,共计 162 块 117.5 W_p 光伏组件,总容量为 19.035 kW。此系统设计 1 套:清水池东侧 10#一台逆变器。

c. 30 kW 逆变器系统

一套 30 kW 系统 10 块一串,24 路并联,共计 240 块 117.5 W_p 光伏组件,总容量为 28.2 kW。此系统设计 4 套:滤池屋顶 11#、12#、13#和 14#四台逆变器。

③ 光伏发电并网方式

本次光伏发电系统的 14 个逆变器系统分别采用六个并网点接入:

a. 1#和 2#并网点

清水池西侧 1#和 2#两台 50 kW 逆变器,容量为 112 kW,清水池西侧 3#一台 50 kW 和滤池西侧两台 30 kW 逆变器,容量为 112.4 kW,分别接入 I 系列滤池 0.4 kV 系统的 I 段和 II 段低压母线。

b. 3#和 4#并网点

清水池西侧 4#一台 50 kW 逆变器和清水池中间 5#一台 50 kW 逆变器,容量为 105.7 kW,清水池中间 6#一台 50 kW 和滤池东侧 13#和 14#两台 30 kW 逆变器,容量为 106.1 kW,分别接入 II 系列滤池 0.4 kV 系统的 I 段和 II 段低压母线。

c. 5#和 6#并网点

清水池中间 7#一台 50 kW 逆变器和清水池东侧 8#一台 50 kW 逆变器,容量为 98.345 kW,清水池东侧 9#一台 50 kW 逆变器和 10#一台 20 kW 逆变器,容量为 68.735 kW,分别接入厂前区配电室 0.4 kV 系统的 I 段和 II 段低压母线。

④ 光伏发电系统电力监控

光伏发电系统监控原理见图 4。

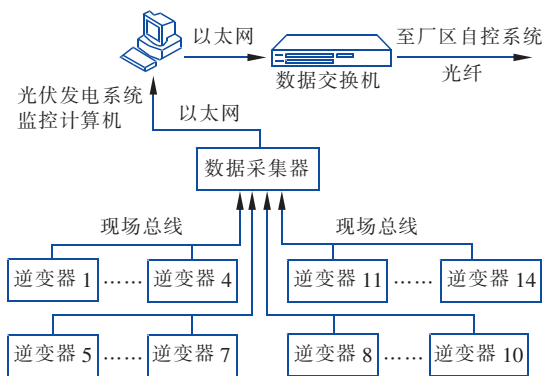


图4 光伏发电系统监控原理

Fig.4 Diagram of monitoring for photovoltaic power generation system

所有逆变器采用 485 通信线串联方式连接,通信线集中连接于数据采集器中,逆变器数据采集至西侧滤池配电室的光伏发电系统监控计算机。光伏逆变器的所有运行数据可通过厂级环网传至自控系统。

⑤ 防雷接地设计

由于光伏阵列突出地面较高,且场地周围较为开阔,在设计和建设过程中,须进行防雷接地设计,确保光伏电站长期可靠有效地运行。

据本项目地形特征、地质特点及设施分区,在不同区域分别采用固定式避雷针和提前放电式避雷针,以太阳电池方阵的钢支架作为光伏电池方阵的水平接地带,接地网采用 40 mm × 4 mm 的热镀锌扁钢,接地极采用 50 mm × 50 mm × 2 500 mm 的镀锌角钢。

本接地极与现场的接地网系统相连接,各拐角处做成弧形,接地网和接地极应可靠焊接,焊接长度 ≥ 80 mm,焊接部位做防腐处理,接地电阻不大于 1 Ω。

太阳能电池板方阵支架、接线箱、逆变器、配电箱等均接地;其他所有电源的工作接地为一体,接地

电阻不大于 $1\ \Omega$ 。组成光伏阵列的太阳能电池板要求绝缘耐压在 $1\ 000\ \text{V}$ (一般太阳能电池板产品耐压为 $600\ \text{V}$)。在光伏发电系统的所有电路节点均设计安装防雷保护电路。

2.7 系统安全

① 光伏阵列防腐措施

虽然光伏电池板放置于顶部密封的清水池和滤池上部,但水厂存在的腐蚀性气体对光伏电池组件及支架的危害仍较严重,为此本项目对太阳能电池板支架进行强化耐腐蚀处理。所有钢结构件采用整体热镀锌工艺:当构件的材料厚度小于 $5\ \text{mm}$ 时,镀层的厚度不得小于 $65\ \mu\text{m}$ 。当构件的材料厚度大于 $5\ \text{mm}$ 时,镀层的厚度大于 $86\ \mu\text{m}$ 。现场仅使用螺栓安装,不进行切割或焊接处理,采用耐腐蚀能力强的紧固螺栓,保证光伏阵列的使用寿命达到 25 年以上^[7]。

② 光伏阵列结构安全保障

本工程光伏阵列支架采用镀锌钢构架拼装的三角形钢构件,单个光伏支架由前立柱、后立柱、找平梁、钢斜撑、混凝土柱墩和钢连接件等组成,借助钢结构设计通用软件 SAP2000 的建模,并按《光伏发电站设计规范》要求的光伏支架需承受光伏组件和自身质量产生的恒荷载、风荷载、雪荷载和地震荷载等作用力进行受力分析^[8],计算出连接部件的最优截面,确定选择的材料及结构方式,满足工程使用需求。

③ 电气系统安全保障

光伏发电系统经过电能质量测试仪测试合格后才能投产使用,不会对电气系统造成影响。电力系统运行过程中,通过内嵌的主动式电子检测技术防止孤岛运行。

在光伏发电系统与市电分界处设置断路器,用于保护厂级配电系统安全;同时在光伏发电系统汇流柜内设置电能检测器件,保证实时监控光伏发电系统运行,如发生异常情况可立即切断与系统的电气连接。

3 光伏发电系统能效分析

3.1 发电量实测与分析

本项目光伏发电系统的装机容量为 $603\ \text{kW}$, 2018 年实测运行数据见表 2。

由表 2 数据可见,全年发电量约为 $80.31 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

表 2 2018 年亦庄光伏发电系统发电量统计

Tab.2 Generating capacity of Yizhuang photovoltaic power generation system in 2018 $\text{kW} \cdot \text{h}$

月份	发电量	自用电量
1	31 579	31 579
2	43 512	43 512
3	45 794	45 794
4	72 479	72 479
5	100 286	100 286
6	109 767	109 767
7	93 705	93 705
8	83 817	83 817
9	79 399	79 399
10	68 151	68 151
11	38 777	38 777
12	35 847	35 847
合计	803 113	803 113

首年光伏发电量约为 $80.31 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h}$, 根据实际运行经验考虑:光伏发电系统首年衰减系数为 2.5% ,第 1~25 年的每年衰减系数为 0.7% 。计算此次光伏发电项目的发电量数据如下:

第 1 年发电量为 $803\ 113\ \text{kW} \cdot \text{h} \times (1 - 2.5\%) = 783\ 035.2\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

按照 1~25 年的逐年衰减系数为 0.7% 计算,可计算推出 1~25 年年均发电量为 $58.75 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。25 年(不含首年)累计发电量为 $1\ 468.89 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3.2 节能计算

光伏发电作为一种清洁能源,既不直接消耗资源,同时也不会释放 CO_2 ,不产生 SO_2 、 NO_x 化合物和粉尘等污染物^[3]。

我国每 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 电平均耗煤为 $309\ \text{g}$ 标煤。本项目光伏发电系统预计 1~25 年年均节约标煤量约为: $58.75 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h} \times 309\ \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h}) = 181.53\ \text{t}$ 标煤。

根据 2007 年国际能源署《世界能源展望 2007 数据》, CO_2 的排放指数为 $0.814\ \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。所以年均 CO_2 减排量: $58.75 \times 10^4\ \text{kW} \cdot \text{h} \times 0.814\ \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) = 478.22\ \text{t}\ \text{CO}_2$ 。

年均 SO_2 减排量(煤中 SO_2 转化率取 90% ,煤中硫含量取 2% ,并假定燃煤未采取脱硫装置): $181.53 \times 2 \times 90\% \times 2\% = 6.53\ \text{t}\ \text{SO}_2$ 。

年均 NO_x 化合物减排量: $181.53 \times 0.037\ 5 = 6.81\ \text{t}\ \text{NO}_x$ 。

本项目能效分析仅考虑 25 年内光伏发电系统的经济使用寿命。早在 1983 年光伏发电组件就已经在我国兰州市安装,距今已有 36 年之久。所以太阳能光伏发电带来的效益将远超以上分析数据。

4 结语

结合城市大型水厂闲置空间较大、用电负荷高且生产运行连续不间断等特点,采用太阳能光伏发电技术为水厂提供电能,响应了国家的节能减排政策,同时降低了水厂的电能消耗。

参考文献:

- [1] 李磊. 小型户用光伏离网逆变器的研究与设计[D]. 合肥:安徽大学,2016.
Li Lei. Research and Design of Small Off - Grid Photovoltaic Inverters for Household Use [D]. Hefei: Anhui University, 2016 (in Chinese).
- [2] 王守中,张统,张琪. 农村污水处理太阳能光伏独立供电系统研究及工程示范[J]. 中国给水排水,2017,33(22):106-110.
Wang Shouzhong, Zhang Tong, Zhang Qi. Research and engineering demonstration of solar energy standalone power generation system on rural sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 106-110 (in Chinese).
- [3] 张东波,徐海燕,邬亦俊,等. 新型现代化大型净水厂工程设计[J]. 给水排水,2017,43(8):9-13.
Zhang Dongbo, Xu Haiyan, Wu Yijun, et al. Engineering design of new type modernized large-scale water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(8): 9-13 (in Chinese).
- [4] 曹海欧,韩建. 基于 PLC 分布式光伏发电控制系统的设计[J]. 仪表技术,2019(1):31-34.
Cao Haiou, Han Jian. Design of distributed photovoltaic power generation control system based on PLC [J]. Instrumentation Technology, 2019 (1): 31-34 (in Chinese).
- [5] 江维新. 火古龙光伏电站总体设计方案比选研究[J]. 四川水利,2018,39(4):54-55,62.
Jiang Weixin. A comparative study on the overall design scheme of Huogulong photovoltaic power station [J]. Sichuan Water Conservancy, 2018, 39(4): 54-55, 62 (in Chinese).
- [6] 李加奎. 基于占空比扰动法的 MPPT 光伏逆变器的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
Li Jiakui. Research on MPPT Photovoltaic Inverters Based on Duty Cycle Perturbation Method [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018 (in Chinese).
- [7] 刘晓明,严俊泉,黄棚兰. 太阳能发电在水处理行业中的创新应用[J]. 中国给水排水,2015,31(18):90-94.
Liu Xiaoming, Yan Junquan, Huang Penglan. Innovative application of solar power generation in water treatment industry [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(18): 90-94 (in Chinese).
- [8] 张开海. 分布式光伏发电系统在某污水处理厂中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(22):81-84.
Zhang Kaihai. Application of distributed photovoltaic power generation system in a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 81-84 (in Chinese).



作者简介:董威(1981-),男,北京人,大学本科,高级工程师,主要从事水厂、污水厂电气、仪表自控设计等工作。

E-mail: dongwei@bmedi.cn

收稿日期:2019-03-15