

“双碳”背景下某水厂低碳化电气设计实践

王胜利¹, 李亚东²

(1. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031;

2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 结合“双碳”政策和长期的实践与摸索, 总结提出低碳化电气设计主要由低碳化电气系统设计和低碳化电器设备选型两个方面组成。详细介绍了水厂低碳化电气设计方案的过程及各个设计环节的具体做法, 低碳化电气系统设计以供配电系统为基点, 融合了电能质量治理、光伏发电系统、电动机节能优化、智能照明系统和智能配电系统等低碳化解决方案; 结合工程特点、经济概算及市场情况等综合因素, 在 10 kV 环网柜、变压器和照明灯具等电器设备的选型方面做了更多低碳化的考量, 并对其融合应用产生的效益进行了碳减排的预估。

关键词: 供配电系统; 低碳化设计; 光伏发电系统; 电能质量; 智能配电系统; 碳减排

Low carbon electrical design practice of water plant under the background of dual carbon

WANG Shengli¹, LI Yadong²

(1. Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100031, China;

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

Abstract: Based on the dual carbon policy and long-term practice and exploration, it is concluded that the low carbon electrical design mainly consists of low carbon electrical system design and low carbon electrical equipment selection. The process of the low carbon electrical design scheme of the water plant in detail and the specific practices of each design link is introduced: the low carbon electrical system design is based on the power supply and distribution system, integrating the low carbon solutions such as power quality control, photovoltaic power generation system, motor energy saving optimization, intelligent lighting system and intelligent power distribution system; In combination with the project characteristics, economic budget estimates, market conditions and other comprehensive factors, more low-carbon considerations have been taken in the selection of 10kV ring main unit, transformer, lighting fixtures and other electrical equipment, and carbon emission reduction estimates have been made for the benefits of their integration and application.

Key words: power supply and distribution system; low-carbon design; photovoltaic power generation system; power quality; intelligent power distribution system; carbon emission reduction

0 引言

2021年3月, 国家制定了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和

2035年远景目标纲要》, 提出“双碳”目标。

2021年10月国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》。统计数据显示, 市政水厂作为市政行

业中重要的能量消耗终端之一，最大碳排放单元为电能损耗，占比约为47%。因此，做好市政水厂低碳化电气设计是减少碳排放的有效手段，也是践行“双碳”目标的重要途径。

水厂低碳化电气设计以北京某水厂为项目背景，重点从低碳化电气系统设计和低碳化电器设备选型两个方面详细阐述低碳化电气设计内容。

1 低碳化电气系统设计

水厂低碳化电气系统设计过程中，通过方案比选将变配电室靠近生产负荷中心，合理选择了供电电压，使整个供配电系统简单、可靠^[1]。结合光伏发电系统构建自给型微能源网络，有效地实现碳减排。在各变配电室低压配电系统侧采用静止无功发生器补偿的方法提高配电系统功率因数，使供配电系统在运行中的损耗降至最低，采用集中有源滤波方式，有效抑制了谐波，改善了供配电系统不平衡状况，抑制了电网谐振等。水厂中单机功率较大的电动机设备在配电设计时，设置变频调速装置有效地实现电动机的起动、停止及调速的低碳节能。通过智能照明及智能配电系统，优化电能分配和改善能耗使用效率，实现供配电系统的经济合理，达到低碳节能的目的^[2]。

1.1 供配电系统

水厂为区域级主力水厂，用电负荷等级为一级负荷。水厂主要负荷集中在配水泵房、进水泵房、机加池、臭氧系统、滤池、污泥处理系统和膜处理车间等，水厂主要生产构筑物及设备用电负荷统计见表1。

其中，配水泵（750 kW，4用2备）和进水提升泵（400 kW，2用2备）均采用10 kV电压等级，其余用电设备电压等级均为0.4 kV/0.23 kV。

结合负荷分布、占地面积、经济、能耗、系统压降和运行管理等因素，确定变配电选址方案。计算负荷见表2。

表 1 水厂主要生产构筑物及设备的用电负荷统计

Tab. 1 Power load statistics of main production structures and equipment of the water plant

序号	生产构筑物名称	计算负荷 /kW	安装负荷 /kW	计算视在负荷 /kV·A
1	配水泵房	81	178	101
2	10 kV 配水泵	3 000	4 500	3 158
3	进水泵房	188	472	209
4	10 kV 进水泵	800	1 600	842
5	格栅间、进水阀门井、混合井	131	233	163
6	机械加速澄清池	216	288	270
7	滤池组团	421	682	475
8	污泥系统	137	242	153
9	污泥脱水车间	422	696	495
10	臭氧制备间	196	254	214
11	膜车间	1 240	2 314	1 246

表 2 水厂计算负荷

Tab. 2 Calculated load of water plant

配电室名称	10 kV 计算负荷 /kW	0.4 kV/0.23 kV 计算负荷 /kW	计算负荷总计 /kW	变压器配置	备注
配水泵房总变	3 000	-	3 000	-	
配电室 MCC1	-	258	258	2×315	同时运行，容量 100% 备用
进水区分变	800	-	800	-	
配电室 MCC2	-	987	987	2×1 000	同时运行，容量 100% 备用
滤池分变	-	1 163	1 163	2×1 250	同时运行，容量 100% 备用
配电室 MCC3	-	1 240	1 240	2×1 250	同时运行，容量 100% 备用
膜系统分变	-	1 240	1 240	2×1 250	同时运行，容量 100% 备用
配电室 MCC4	-	1 240	1 240	2×1 250	同时运行，容量 100% 备用
小计	3 800	3 648	7 448	-	

根据电气设备负荷及各变配电室分布位置，有效地节约了电力电缆使用量，降低了电能损耗，合理选择10 kV及0.4 kV两种供电电压等级，整个供配电系统简单、可靠^[1]。

1.2 光伏发电系统

本次水厂利用综合楼屋顶及清水池顶上分别

设置光伏发电系统,其中综合楼屋顶有效利用面积约850 m²,清水池上有效利用面积约4 500 m²。光伏发电系统采用分布式并网形式,光伏发电系统含光伏组件、汇流设备、交流配电柜、电缆敷设及防雷接地等。

光伏组件选用450 W_p单晶硅组件,根据GB 50797《光伏发电站设计规范》得出北京地区最佳安装倾角为32.8°。根据测算,综合楼处的光伏发电系统装机容量约为55 kW_p,清水池处的光伏发电系统装机容量约为303 kW_p,并网逆变器采用专用支架在屋面及池顶安装,具体安装位置现场可根据实际情况调整。各逆变器电源分别就近并网接入膜系统分变配电室和滤池分变配电室0.4 kV系统中I段和II段母线,构建了自给型微能源网络,将光伏发电系统发出的电能源源不断地提供给水厂的用电设备^[3]。

根据GB 50797《光伏发电站设计规范》,本次光伏发电系统年发电量估算计算公式为

$$E_p = H_A / PKE_s \quad (1)$$

式中, K 为光伏系统综合效率系数; H_A 为水平面太阳总辐照量,单位为kW·h/m²; E_p 为并网发电量,单位为kW·h; E_s 为标准条件下的辐照度(常数),单位为kW/m²。

经计算,综合楼处光伏发电系统并网年发电量约为64 532.6 kW·h,清水池处光伏发电系统并网年发电量约为341 643.4 kW·h,本次光伏发电系统合计年发电量约为406 176.1 kW·h。

1.3 电能质量治理

电能质量治理包括无功功率补偿及谐波抑制两个部分。本次水厂中10 kV侧的进水提升泵和配水泵均采用变频调速装置进行配电及拖动控制,可不无功功率补偿。在各变配电室0.4 kV侧设置静止无功发生器进行集中自动无功功率补偿,补偿后的功率因数达到0.95以上。功率因数的提高,不仅可以减少线路及变压器的损耗,还可以降低电缆和其他电气设备的容量等。

在各变配电室的0.4 kV侧集中设置有源滤波器,有效抑制了谐波,降低了电能的损耗。图1为

进水区分变配电室0.4 kV系统电能质量治理方案。

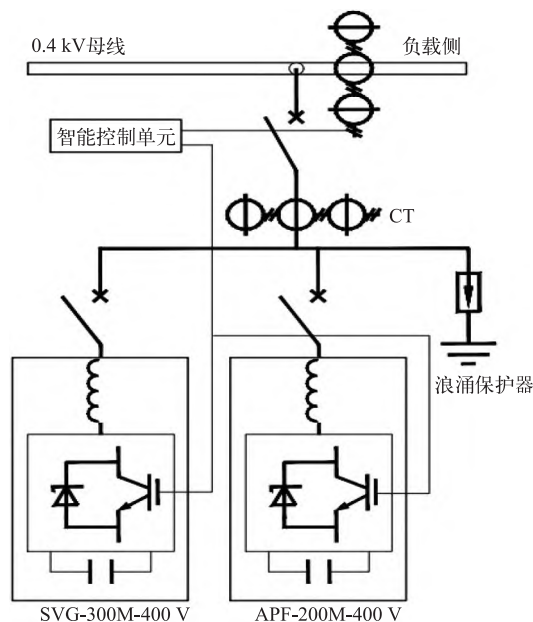


图1 进水区分变配电室0.4 kV系统电能质量治理方案

Fig. 1 Power quality control scheme for 0.4 kV system in water inlet distribution room

综上所述,电能质量治理是低碳化电气设计中必不可少的部分。

1.4 电动机节能优化

结合工艺设计、运行需求及市场因素,本次水厂供配电系统设计进水提升泵和配水泵,采用10 kV变频调速装置进行配电及拖动控制,滤池鼓风机、反冲洗泵和废水池回流水泵等均采用0.4 kV变频调速装置进行配电及拖动控制。变频调速技术是电动机低碳节能运行的一个重要方式。轻载时,可通过变频装置的调速改变电动机的运行工况,提高电动机的效率,达到低碳节能的目的^[4]。

根据流体相似定律,水泵的流量 Q 正比于转速,水泵的扬程 H 正比于转速,水泵机组的电动机功率 P 正比于转速^[5]。水泵、风机变频调速后的节电率计算式为

$$P\% = KS^3 \quad (2)$$

$$N\% = 1 - P\% \quad (3)$$

式中, $P\%$ 为实际消耗功率百分值; S 为实际转速百分值; K 为系数, $K=0.000 1$; $N\%$ 为节电率。

结合实际运行情况，水厂中通常有台工作频率在42 Hz以下的配水泵机组，一台工作频率在45 Hz以下的提升水泵机组。反冲洗工况下，两台滤池鼓风机和两台反冲洗泵的工作频率均设定为42 Hz。两台废水池回流水泵的工作频率均设定在40 Hz。根据变频调速原理，当配水泵

机组运行频率在42 Hz时，转速为额定转速的84%。结合式（2）和式（3）可得配水泵机组节电率为40.73%。同理可得：提升水泵机组节电率为27%；滤池鼓风机和反冲洗泵机组节电率为40.73%；废水池回流水泵机组节电率为48.8%。

最终初步估算上述电动机每天的总节电值Q为

$$Q \approx 24 \times [750 \times 40.73\% + 400 \times 27\% + 2 \times (75 + 50) \times 40.73\% \times 6.67\% + 2 \times 45 \times 48.8\%]$$
$$Q \approx 11\,140.48\text{ kW}$$

其中，滤池鼓风机及反冲洗水泵为间歇运行方式，1天反冲洗12次，1次8 min。

折算年节省电量至少406.63万kW·h，根据国家发展改革委气候司发布的减排量数据，每年节电折算390.36万t CO₂的碳减排。

1.5 智能照明系统

水厂中照明具有范围广、面积大和能耗大等特点，而目前照明控制系统仍然以简单的手动控制为主，不仅增加了更多的人力，而且消耗了更多的电能，明显滞后于当前的技术发展，与“双碳”目标背道而驰。

因此，水厂设计了一套智能照明系统，它由现场层、通信层和控制层组成。现场层共设计了34台智能照明配电箱，典型智能型照明系统图如图2所示，接入了智能开关和红外感应、温湿

度检测等仪表；通信层利用KNX等标准通信协议进行前端检测仪表与智能控制器之间的通信，智能控制器通过以太网交换机将数据传输至控制层；控制层由监控计算机及配套智能控制软件组成，可根据不同的应用场景制定照明控制策略，例如手动控制、自动控制、场景控制、定时控制、中央控制和系统联动等。

智能照明系统的应用提高了照明控制的自动化水平，优化了照明时间，减少了非必要的照明电能消耗。本水厂照明计算负荷总共约195 kW，如平均每天减少1 h的照明时间，可折算年节省电量至少7.1万kW·h。

1.6 智能配电系统

“双碳”目标背景下，智能配电系统在实际电力运维过程中发挥着举足轻重的作用^[6]。结

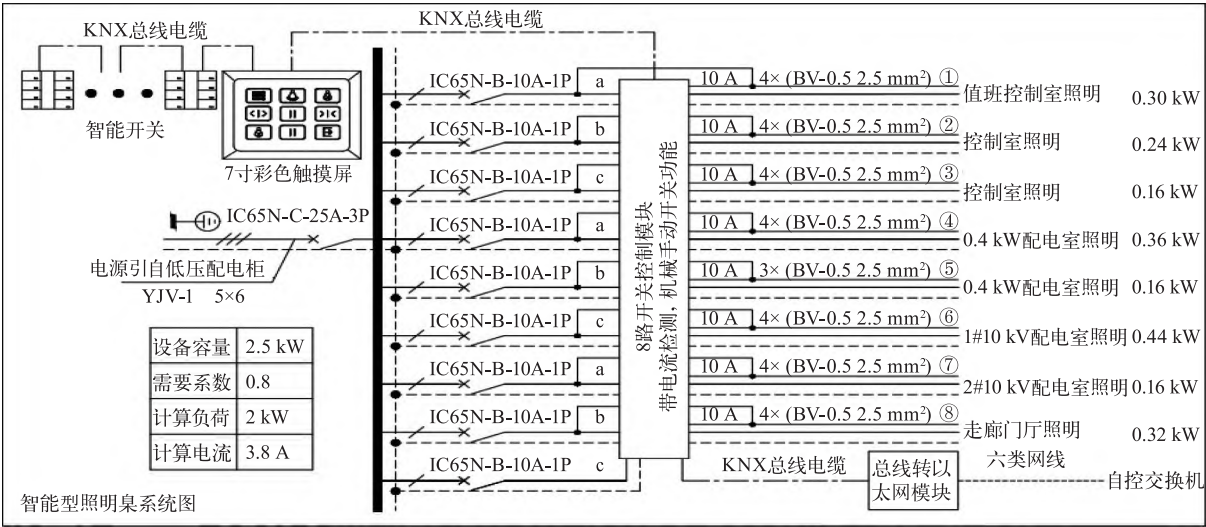


图2 典型智能型照明系统图
Fig. 2 Typical intelligent lighting system diagram

合供配电系统设计了一套智能配电系统，由计算机、智能配电系统软件、通信管理机、微机保护装置、电能数据采集器、测控仪表和智能断路器等组成。

水厂分别在3个变配电室安装的微机保护装置、电能数据采集器、测控仪表和智能断路器等智能设备，通过RS 485总线接入现场通信管理机，通信管理机主动采集现场智能设备的数据，并可进行规约转换、数据存储，通过以太网交换

机把数据上传至智能配电系统服务器，智能配电系统软件平台对供配电系统各环节特别是高能耗设备进行数据采集，对数据进行系统性分析，实现对电能质量、电能使用效率和电气资产的管理，如图3所示。

最终，结合运行策略和节能经验，持续提供优化设备运转效率、改善生产流程的方式，同步制定相应的电能管理策略，达到提高电能使用效率的目的。

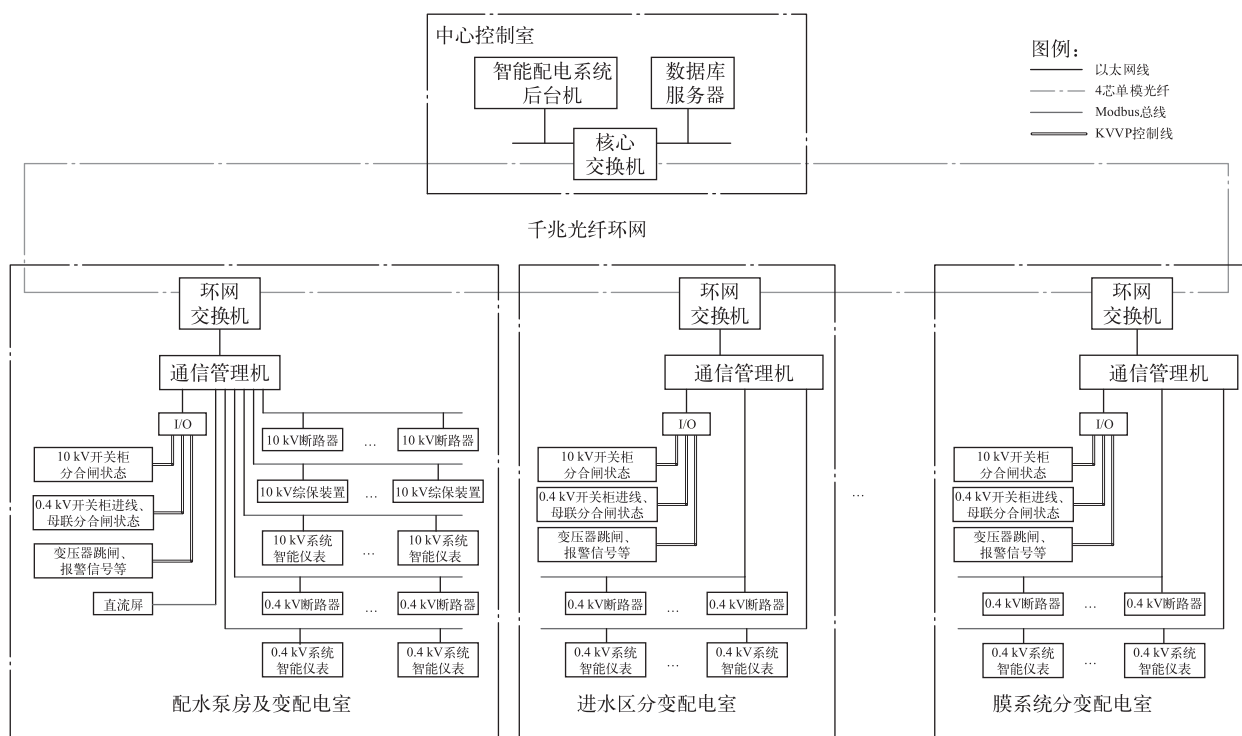


图3 水厂智能配电系统配置图

Fig. 3 Configuration diagram of intelligent power distribution system of water plant

2 低碳化电器设备选型

在“双碳”目标背景下，电器产品的功能、性能以及自身的节能环保属性等，对变配电系统乃至水厂的绿色、低碳和可持续运营均会产生深远影响。低碳化电气设计采用了10 kV环保气体环网柜、节能型变压器和LED照明灯具等，这些电器设备的特点主要表现在产品的模块化、智能化升级和使用材料的绿色环保、低碳循环。

2.1 环保气体环网柜

目前，全球大部分10 kV环网柜主开关设备的绝缘气体使用的是强效温室气体 SF_6 ，而 SF_6 助长温室效应的威力是 CO_2 的23 900倍。目前一台中压 SF_6 开关柜需使用0.3~2.0 kg SF_6 ，长期使用和排放将对环境造成很大的影响。

电气设计方案中，在滤池分变配电室和膜系统分变配电室分别设置两组10 kV环网柜，一共8面。本次10 kV环网柜中的主开关设备采

用环保气体——干燥空气作为绝缘气体。10 kV 环网柜采用环保气体方案后，CO₂减排降幅超过99.99%，以单个环网柜使用约2 kg SF₆气体为例，本方案减少的SF₆相当于减少CO₂排放量46.96 t，在全生命周期内合计可以实现375.68 t CO₂的碳减排。

2.2 非晶合金干式变压器

根据统计数据显示，我国输配电损耗占全国发电量的6%左右，电网中变压器损耗约占输配电电力损耗的40%，具有较大的节能潜力。变压器作为变配电系统中能耗较高的设备之一，其合理选型尤为重要^[7]。

考虑到水厂负荷较大、变压器使用时间较长等因素，本次供电系统设计采用二级能效非晶合金干式变压器。非晶合金是一种新型节能材料，空载损耗比同等系列干式变压器下降70%左右。经计算，SCBH17型非晶合金干式变压器对比SCB14型电工钢带配电变压器年节约电量约4.97万kW·h，详见表3。

表3 变压器节能分析

Tab. 3 Analysis of transformer energy saving

变压器容量 / (kVA)	SCBH17型空载损耗 / W	SCB14型空载损耗 / W	变压器数量	日节电量 / (kW·h)	年节电量 / (kW·h)
315	235	600	2	17.52	6 394.8
10 00	470	1 205	2	35.28	12 877.2
1 250	550	1 420	4	83.52	30 484.8

注：表格中数据来源于GB 20052—2020《三相配电变压器能效限定值及能效等级》。

结合市场调研，非晶合金节能型变压器较电工钢带节能变压器投资高20%~30%，超出投资费用预计5~8年内回收。

2.3 LED照明灯具

工程照明设计采用LED照明灯具，LED灯具对比以往普通的节能灯，具有耗能低、寿命高等特点。

水厂照明计算负荷总共约195 kW，如照明灯具采用普通节能灯，其照明计算负荷约325 kW，如采用LED照明灯具对比使用LED照

明灯具，每天可节省电量3 120 kW·h，年节省电量113.88万kW·h。

3 结束语

以某水厂工程的电气设计为实例，在遵循电气设计的相关规范和基本原则的前提下，结合“双碳”背景，详细介绍了水厂低碳化电气设计内容。该设计方案得到了建设单位、运营单位、设计院、供电部门及施工单位等各参建方的认可，并已成功应用于水厂的供配电系统中。在保障水厂安全、稳定运行的前提下，其吨水电耗指标对比该地区其他水厂有所下降，为实现“双碳”目标迈进一步。

参考文献

- [1] 史晓北. 市政水处理行业电气节能设计实例研究[J]. 环境工程, 2016, 34(7): 171-175.
- [2] 张书盈, 鲁文, 吴琳, 等. 智能园区配用电应用集成构架设计及关键技术[J]. 供用电, 2017, 34(7): 9-14.
- [3] 金强, 史梓男, 马唯婧, 等. 分布式电源接入配电网方案选择研究[J]. 供用电, 2016, 33(5): 22-26.
- [4] 许星辉. 水厂水泵变频调速技改方案及节能效益分析[J]. 建材与装饰, 2020(13): 290-292.
- [5] 刘亮喜. 大型风机水泵变频调速节能的分析[J]. 供用电, 1997(2): 48-50.
- [6] 徐进. 某地下式污水厂智能配电方案设计与思考[J]. 建筑电气, 2022, 41(5): 20-26.
- [7] 曾重谦, 廖民传, 张勇军. 配电网电能损耗的原因与主要降损措施[J]. 供用电, 2009, 26(2): 28-31.

作者简介

王胜利(1969—)，男，工程师，主要从事市政水厂生产管理工作，负责厂内工艺、电气及控制类设备的运行、检修、抢修和更新改造工作。

(收稿日期：2022-12-18)