

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-746-06

高压换流场分区靶向送风研究

谢剑翔 付志超 彭 莱

(广东电网公司广州供电局 广州 510013)

【摘要】 电力已经成为我们生活的基本保障,随着电力需求侧的迅猛扩张,供给侧的规模和容量也在不断加大,高压输电系统的室内热环境保障成为一项至关重要的任务。高压换流场是功能目标明确的能源站建筑,与普通办公、商场等商业建筑相比,换流场不仅对温度要求高,而且对于工作区域的温度分布均匀性要求也高,因此需对其进行精准的空间环境控制,保障直流场设备高效运行。从高压换流场环境研究着手,针对其设备环境的要求,提出分区靶向送风系统设计,并对高压换流场进行分区方案设计。靶向送风针对换流场内散热设备降温,分区主要考虑降低空调系统能耗,相比于传统方案更精准、更高效、更节能。以某一高压换流场为例,将研究空间分为电抗器区域内和电抗器以外空间,针对两个区域环境的不同特点,对其进行不同的方案设计,与传统方案进行比较,分析其在高压换流场内的环境调节效果;利用 FLUENT,模拟出研究空间运用分区靶向送风方案的温度分布效果,分区靶向送风方案能够将特高压直流场内环境温度降至平均温度 33.4°C ,远低于要求温度 40°C ,由此可见分区靶向送风方案能够有效降低温度,均匀空间分布温度场,对高压换流场内环境起到很好的调节作用,从而保障电力设备不间断安全稳定运行。

【关键词】 换流场; 电力设备; 靶向送风; 环境调节

中图分类号 TU83 文献标识码 A

High-pressure Converter Field Partition Targeted Supply Air Study

Xie Jianxiang Fu Zhichao Peng Lai

(Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Guangzhou, 510013)

【Abstract】 Electricity has become the basic guarantee of our lives, with the rapid expansion of the power demand side, the scale and capacity of the supply side is also increasing, and the indoor thermal environment guarantee of the high-voltage transmission system has become a crucial task. Compared with ordinary offices, shopping malls and other commercial buildings, the converter field not only has high temperature requirements, but also has high requirements for the uniformity of temperature distribution in the working area, so it is necessary to control the space environment accurately to ensure the efficient operation of DC field equipment. In this paper, starting from the research of the high-pressure converter field environment, according to the requirements of the equipment environment, the partition target air supply system design is proposed, and the high-pressure converter field is designed as the partition scheme. The targeted supply air cools the heat dissipation equipment in the converter field, and the partition mainly considers reducing the energy consumption of the air conditioning system, which is more accurate, more efficient and more energy-saving than the traditional scheme. Taking a high-voltage converter field as an example, the research space is divided into space outside the flat-wave reactor area and the flat-wave reactor, and according to the different characteristics of the two regional environments, different schemes are designed, compared with the traditional schemes, and the environmental regulation effect in the high-voltage converter field is analyzed; The partition-targeted air supply scheme can reduce

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助 (2019B111109001)

作者(通讯作者)简介: 谢剑翔(1978-),男,本科,研究方向为电网工程建设,电力设备品控, E-mail: 316331795@163@qq.com

收稿日期: 2022-06-07

the ambient temperature of uhVDC field to an average temperature of 33.4°C, which is far below the required temperature of 40°C, which shows that the partitioned targeted air supply scheme can effectively reduce the temperature, uniformly distribute the temperature field in space, and play a good role in regulating the environment in the high-voltage converter field, thereby ensuring the uninterrupted safe and stable operation of power equipment.

【Keywords】 DC Field; Power Equipment; Target the wind; Air Environmental Regulation

0 引言

随着我国生活水平的提高,电子产品和用电量呈爆炸式增长。从2009年起,我国电网规模已超过美国跃居世界第一^[1]。国家能源局的数据显示,2017年全国总用电量为64179亿千瓦时,首次突破6万亿大关,与2008年相比增长83.47%^[2]。能源禀赋与用电负荷反向分布的国情使得“超远距离、超大容量”传输成为国网建设的特点^[3]。

输电工程装机容量的增加,使得换流场静电吸尘效应愈加突出,绝缘子发生污闪故障的概率加大^[4]。当输配电电压较高时,建造户内形式的高压换流场已成为业界共识^[5]。因场内放置有高压电抗器、滤波器、开关装置、母线以及绝缘子等重要电力设备,换流场内的环控效果直接关系到整条输电线路安危,甚至会影响多省市人民群众的生产生活。高效保障户内换流场内的热环境品质对特高压输电工程意义重大。

电力能源的发展也推动着装机容量的不断扩大和电磁性能逐步提升,高压电气设备对所处环境的要求越来越高。因此合理设计高压换流场内气流组织对整个输配线路的平稳运行意义重大,寻求一套集可靠性与安全性于一体的高效室内气流设计方案,成为现今高压输配电工程需要解决的关键问题。

1 高压换流场室内环境要求

高压换流场内空气环境状况是保障电流平稳、安全、高效输配的必要条件。而其换流场内易产生高温环境,过高的温度或较大温度变化梯度直接影响电力设备的可靠性和寿命。尤其是在冬夏两季,用电负荷增加带来电力设备散热量的上升,局部过热现象出现的概率加大^[6]。Ishii等人的研究表明,在5~35°C的范围内,环境温度每升高1°C,绝缘子的污闪电压下降0.7~1.0%^[7]。根据著名的10K法则,即电子元件的失效率随温度的增加而呈指数式增长,对于开关装置中的有些电子器件,环境温度

每上升10K其失效率往往增加一倍以上^[8],由此可见高温已成为电力系统安全事故的主要原因之一,排热降温已然成为室内环境控制的主线^[9-12]。同时HVDC设备用房内电力构件体积庞大、结构复杂,冷却效果的优化也成为当今的难点和热点。

1.1 室内温度参数

户内换流场的室内环境控制中,温度是最为关键的参数,需要严格受控。早期电力设备用房温度参数在选择时,设计师考虑到巡检、维护人员对环境的需要较电力器械更为严苛,常按照《室内空气质量标准》中的“高标准、严要求”进行空气调节系统设计。该标准将夏季空气调节情况下的室内温度规定为22~28°C,冬季供暖情况下为16~24°C^[13,14]。随着我国输电工程的蓬勃发展,输电等级越来越高,高压换流场因其内的电磁场太过强大,“以人为本”的设计理念带来了大量能源的浪费,已不适用于HVDC特高压户内直流场,出于健康和安全的考虑鲜有工作人员进入,多采用巡检机器人例行检查。

1.2 通风降温方式

在高大空间通风降温的气流组织研究方面,张志军指出采用大口径的喷口送风有利于提高室内温度场的均匀性^[15];徐辉通过对现有空调系统的设计改造,对比得出下送上回的空调送风方式比上送下回更能有效降低阀厅室内余热^[16]。白彦红通过对广州供电局高压输电线路绝缘子放电现象的分析,得出在大气湿度过高(大于98%)的情况下,发生严重绝缘放电、线路重副跳闸的风险明显升高^[17]。已有研究表明,环境湿度过低时电力设备则容易受到静电释放的损害^[18],国际IEC60694规定,一般电力设备保持30%到60%的相对湿度最为适宜。

在工厂应用方面,传统的送风方式以稀释型全室送风为主,常见的有上送下回、侧送侧回和下送上回,但是传统送风方式设计的着眼点往往是整个空间,气流的扰动范围广^[19,20]。空调所提供的冷量

和送风量都比较大,控制区内局部降温效果有待商榷的同时空调能耗极大^[2]。

2 分区靶向送风方式探讨

2.1 分区靶向送风方案简介

针对超大空间高压换流场室内气流组织上的重难点,提出分区式靶向送风系统。

分区式靶向送风方案的设计,是结合高压换流场中“热量集中型”“热量均衡型”和“热量分散型”电力设备的特征,对应设计出“靶向式”“工位式”和“整体式”的分区气流组织形式,以“主冷设备,辅冷环境,精确送风”为原则,来提高风系统的降温效果。

面对超大空间的高压换流场建筑,主要散热设备布置在距离周围墙壁 15m 开外的地方,传统沿墙面分散散热器的一般送风方式,依靠贴附射流很难突破距离的限制,尤其是对以电抗器为代表的“热量集中型”电力设备而言,沿墙出流的冷空气到达设备附近时常会出现动量后劲不足、冷量耗损严重的情况,难以达到理想的降温效果。分区式送风的靶向系统由此应运而生,即在保证高电场和磁场安全的情况下,在研究核心区“热量集中型”电力设备周围通过采用高射程喷口定点喷射的方式来达到精确送风目的。

分区与靶向并不是分离的两种概念,二者在气流组织设计时是相辅相成,共同作用的。分区一方面是为了冷气流的有效利用,另一方面也为了对电力设备周围局部小环境聚焦研究提供便利,研究核心区域的划分除要考虑设备几何尺寸和散热特征以外,还需将靶向送风带来的强气流扰动包裹在核心区以内,从而实现核心区与非核心区的气流解耦,达成研究过程中大尺度和小尺度的转换与跨越。靶向则是核心区降温的实现手段,是针对悬置发热体而提出的送风方案,打破传统风口沿墙壁布置的常规思维,通过混凝土风道将喷口提升,拉至发热部位附近的合适位置,保证到达散热设备表面的气流保持足够的冷量和动量。

2.2 高压换流场分区方案

以某高压换流场室内空间为例,根据高压换流场三个区域设备布置特点(见图 1),现将各个区域内送风系统的设计方案确定如下:

分区 1 包括“热量集中型”电力设备——电抗

器及其周围空间,该区域内的热量最为集中,是换流场室内环境控制和保障的关键所在,针对电抗器主体为空心结构、内外表面的降温需求均较高、悬置半空、厚度薄且体型小等特点,其内送风系统设计为“靶向式”,采用高位喷口对散热表面定向输送冷量,以求内外表面气流分配均匀、局部热点温度降到限值以内。

分区 2 包括“热量均衡型”电力设备直流滤波器、RI 电抗器以及它们周围的空间,该区域内设备的散热面积较大但热流密度不高,属于相对常规的散热表面,送风系统设计采用“工位式”,将送风口分散布置于设备周边,在送风气流自带机械动能和浮升力的共同作用下,达到降温效果。

分区 3 是除分区 1 和 2 以外的背景空间,其内构件的散热总量较低但覆盖范围广,有穿梭全场的母线、满布屋顶的灯具以及围护结构,为“热量分散型”。送风系统设计采用“整体式”,在整个区域内合理布置送风口,力求低温气流能够在全空间平均发力。此类方式属于传统的混合送风范畴,该类送风系统的设计在工程中的应用也比较多。

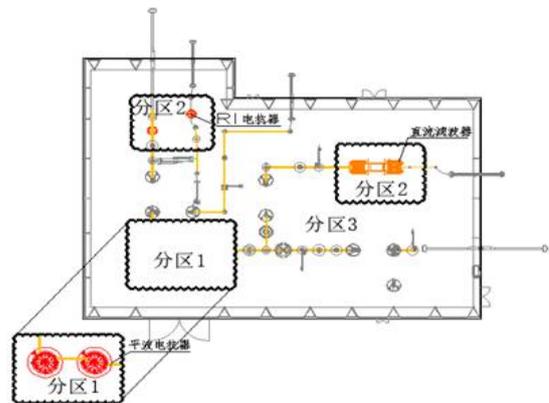


图 1 分区式送风示意图

Fig.1 Schematic map of partitioned air supply

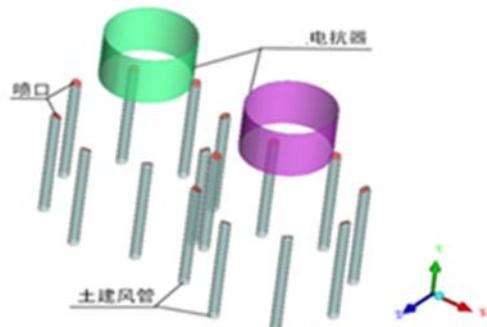


图 2 靶向式送风示意图

Fig.2 Schematic map of targeted air supply

2.3 电抗器的靶向送风布置

电抗器热量集中且体量较小, 是换流场中降温要求最高的元器件, 属短小精悍型, 以某一高压换流场为例, 电抗器及其周围环境所在的分区 1 想要满足既定的环控要求, 其内的送风系统设计有一定难度。针对电抗器“准”字当头的送风需求, 现特提出喷口定点射流的“靶向式”送风系统设计方案, 如图 2 所示。

由于电抗器下部的绝缘支撑架每隔一定高度设置有稳定盘, 在支撑架内部空间设置风口的难度较大, 本文选择将直径为 0.8m 的喷口沿电抗器外围同心圆均匀布置 8 个, 鉴于支撑架的落地半径为 5m, 两平抗的圆心距为 13m, 则同心圆半径宜取 6m, 该设计方式的送风口设置情况详见图 3, 回风口设在电抗器的正上方。

此外, 只有保证到达平抗表面的送风气流具有足够的动量和冷量, 才能更好的起到靶向送风方式的降温效果, 因此喷口高度是关键的影响因素。为了例行检修的正常进行, 喷口平面与平抗下缘应保持至少 5m 的距离, 以预留工作人员和起吊设备的操作空间。

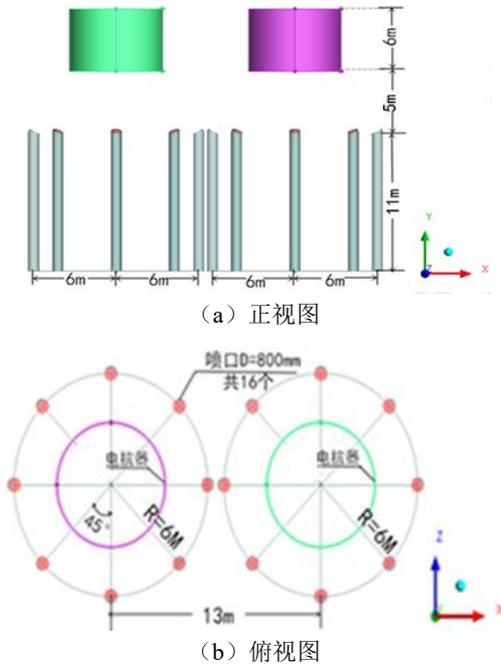


图 3 靶向送风系统定位图

Fig.3 Location map of targeted air supply system

2.4 电抗器以外空间送风布置

由图 1, 相比于分区 1, 其余分区设计环控要求的气流组织方案难度要小很多, 现将分区 2 与分

区 3 合称为电抗器以外空间, 对该空间的送风系统仅做简要分析。送入此空间的冷风除承担消除散热部件余热量的作用之外, 还需为户内直流场提供适宜的大环境温度, 其风系统的设计目标在于营造“稳定”的环境。在送风口的布置位置上, 应兼顾不同部位热流密度的差异, 有选择地控制风口疏密, 使该空间的风系统能够在给大环境降温的基础上, 做到“先冷关键设备, 后冷背景环境”。考虑到该区域的空间尺度较大, 为了扩大低温气流的作用范围, 非核心区送风口特采用地面喷口的形式, 各送风口的定位情况详见图 4、图 5。26 个喷口的分配方案如下:

(1) 秉承“工位思想”的 2 区送风口布置如下: 沿着滤波器横向轴线在其左、中、右依次布置 3 个; 在每个电抗器附近, 选取与该电抗器同心、且半径为 2.5m 的圆周对称布置 4 个。

(2) 秉承“整体思想”的 3 区送风口布置如下: 15 个喷口沿着母线的走势, 在主要散热设备以外的空间较为平均地分散布置。风口的设置要重点注意母线穿墙部位需有风口, 又要尽量保证送风的全区覆盖。

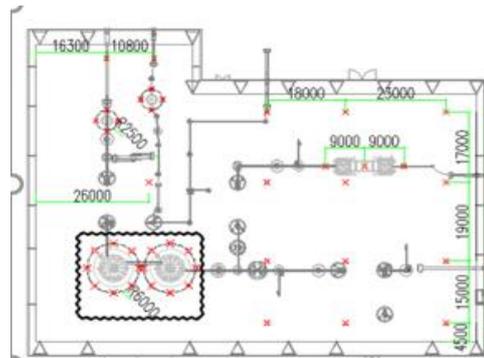


图 4 非核心区送风口定位图

Fig.4 Location map air outlet in non-core area

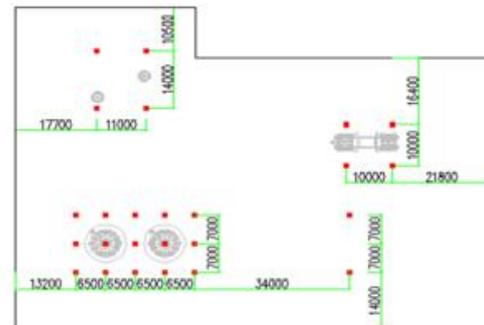


图 5 回风口定位图

Fig.5 Location map of return air

3 FLUENT 模拟结果

根据此高压换流场特点,结合分区靶向式送风系统的设计方案,现选取送风温度为 27℃、平波

电抗器周围高位喷口风速为 5m/s、其他送风口风速为 3m/s 的工况对全室空间进行数值模拟计算,本次模拟的风口设置情况如表 1 所示。

表 1 全室模拟的风口设置情况汇总表

Table 1 Wind-galp setting summary table of whole room simulation

非核心区送风送回风方式	电抗器以外送风口	核心区送回风方式	电抗器周围喷口	回风口
下送上回	地面喷口 $D=0.6$, 共 26 个, 送风风速 3m/s, 送风温度为 27℃	下送上回	圆型喷口 $D=0.8m$, 共 16 个, 标高 11m, 倾角 60° , 送风风速 5m/s, 送风温度为 27℃	屋顶回风口 $1m \times 1m$, 共 25 个, 标高 37m

在 FLUENT 模拟中,得到在分区靶向式送风方案下的高压换流场室内空气平均温度为 306.4K ($33.4^\circ C < 40^\circ C$),满足大环境的温度设计要求。选取典型特征平面 $X=73m$ (直流滤波器的纵向中心截面)、 $Y=26m$ (户内直流场工作区的最高水平面)和 $Z=22m$ (RI 电抗器的横向中心截面)的温度情况如图 6 所示。模拟结果发现局部高温出现在电抗器周边区域,室内空气温度呈现以电抗器为基点向四周逐渐降低的趋势;电抗器和直流滤波器所在空间区域的温度分布比较均匀,周围环境最高温度分别为 308.2K ($35.2^\circ C$)和 306K ($33^\circ C$),与电力设备周围环境最高温度限值 $45^\circ C$ 相比还存在有较高安全裕度;对于环状结构的电抗器而言,其内侧空间局部最高温度为 315.2K ($42.2^\circ C$),外侧环境最高温度 318.3K ($45.3^\circ C > 45^\circ C$),在电抗器外侧空间出现有安全隐患的局部热点。

模拟结果表明电抗器是场内靶向送风系统设计的关键关注对象。靶向式送风方案依靠集中喷射的高动量气流,以求在小范围内对目标精准降温、减少平抗散热量对直流场内其他区域的影响,但不合理的送风参数设置会较大程度地抑制靶向风的优势,甚至会导致局部热点温度超过限值的危险。

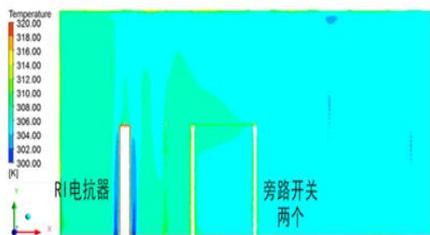


图 6 $Z=22m$ 特征截面温度云图

Fig.6 Temperature cloud map in characteristic section $Z=22m$

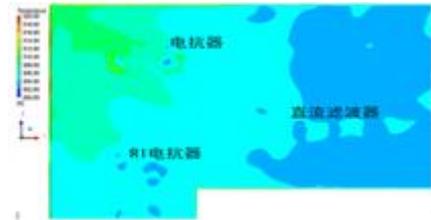


图 7 $Y=26m$ 特征截面温度云图

Fig.7 Temperature cloud map in characteristic section $Y=26m$

4 结论

高压换流场内电力设备的安全运行对室内空气流环境有着严格要求。基于“主冷设备,辅冷环境,精确送风”的设计理念,本文提出分区式靶向送风方案,并以某高压换流场为例进行探讨,对“热量集中型”、“热量均衡型”和“热量分散型”三种电力设备类型,对应采用“靶向式”“工位式”和“整体式”的送风系统,探究了该新型气流组织的具体设计方案。FLUENT 模拟结果表明分区式靶向送风系统能够实现送入空调冷风的高效利用,采用靶向送风方式对于高压换流场的环境调节有很好的效果。

参考文献:

[1] 齐正平,林卫斌.改革开放 40 年我国电力发展十大成就[J].电器工业,2018,(10):7-14.

[2] 王仲颖,郑雅楠.改革开放 40 年我国电力发展回顾与展望[J].中国电力企业管理,2018,(25):43-47.

[3] 袁青云.特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2005,(14):1-3.

[4] 杨金根,张凌,钟伟华.特高压户内直流场设计研究[J].电

- 力建设,2007,(5):1-7.
- [5] 申卫华,胡明,王黎彦,等.特高压直流换流站直流场型式比较及选择[J].电力建设,2007,(5):8-11.
- [6] 侯国斌,邓晓峰,吴艺红,等.电力开关设备温升仿真研究综述[J].电器与能效管理技术,2017,(11):1-6.
- [7] Ishii M, Akbar M, Kawamura T. Effect of ambient temperature on the performance of contamination DC insulators[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984,EI-19(2):129-134.
- [8] 于慈远,于湘珍.电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究[J].微电子学,2000,(30):334-337.
- [9] Arifianto I, Cahyono B. Power transformer cooling system optimization[C]. 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. IEEE, 2009:57-59.
- [10] 李百根.特高压变电站建设中安全节能方案探讨——评《特高压变电站绿色低碳建筑》[J].中国安全生产科学技术,2020,16(5):189-189.
- [11] 韩奕,周勤勇,高骞,等.特高压变电站分区供电能力分析[J].全球能源互联网,2019,2(2):201-208.
- [12] 邱宁,王晖.特高压变电站消防重点与规范问题探讨及改进措施[J].变压器,2019,56(8):19-23.
- [13] 慕莉,潘筱.1000kV特高压变电站带电作业试验研究[J].现代工业经济和信息化,2018,8(16):124-125.
- [14] 费焯,刘云鹏,陈江波,等.特高压 GIL 壳体温升测试分析及工程运维措施建议[J].高压电器,2020,56(12):292-296.
- [15] 张志军,郑劲,陈东.特高压直流输电工程高端阀厅空调通风系统的设计[J].电力建设,2009,30(9):15-19.
- [16] 徐辉,张斌,赵欣洋,等.换流站阀厅空调系统优化研究[J].过滤与分离,2016,26(4):6-8.
- [17] 白彦红.大气污染程度对空气绝缘电气设备外绝缘影响的试验研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [18] Gao X, Talebzadeh A, Moradian M, et al. Dependence of ESD charge voltage on humidity in data centers: Part III — Estimation of ESD-related risk in data centers using voltage level extrapolation and Chebyshev's inequality[J]. ASHRAE Transactions. 2015,121:49-57.
- [19] Li Z H, Zhang J S, Zhivov A M, et al. Characteristics of diffuser air jets and airflow in the occupied regions of mechanically ventilated rooms—a literature review[J]. ASHRAE Transaction, 1993,99(2):1119-1120.
- [20] Guangyu Cao, Hazim Awbi, Runming Yao, et al. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings[J]. Building & Environment, 2014,73(1):171-186.
- [21] 刘显祖,熊泽群,许昂鹏,等.虚拟现实技术在特高压变电站的应用[J].安徽电力,2020,(1):35-38.