

# 环境风影响下换流变压器空冷换热系统 换热能力衰减特性研究

杨焱<sup>1</sup>, 李早阳<sup>1</sup>, 王君岚<sup>1</sup>, 罗金平<sup>1</sup>, 刘立军<sup>1</sup>, 赵欣洋<sup>2</sup>, 陈昊阳<sup>2</sup>, 杨晨<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 750000, 银川)

**摘要:** 为实现换流变压器冷却系统换热容量的合理设计并保障其安全稳定运行,研究了环境风影响下换流变压器空冷换热系统换热能力的衰减特性。针对北方某换流站换流变压器,采用基于空冷换热系统大尺度热量传递与换热器翅片管束小尺度换热计算相耦合的方法,建立了包含空冷换热器、风机、防火墙、环境风等多种因素在内的三维传热流动数值分析模型。研究了环境风向及风速对空冷换热系统换热能力的负面影响机制,获得了真实环境条件下换热能力的衰减特性。结果表明:正前方风向下,换热器进风体积流量随风速增加而显著减小、进气温度的略有下降,导致不同风速下换热效率维持在66.01%~66.75%之间;侧方风向下,迎风侧防火墙阻碍了气流运动,导致换热效率随风速增加在55.98%~83.13%之间变化,其中环境风速为6 m/s时换热效率最低;正后方风向下,与风机出流方向相同的环境风引起换热器附近更加剧烈的热风回流,导致换热效率随风速增加,在50.96%~91.46%之间变化,其中环境风速9 m/s时换热效率最低。研究结果可为换流变压器空冷换热系统换热容量的设计提供一定的参考。

**关键词:** 换流变压器;空冷换热系统;环境风;换热量

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202412008 **文章编号:** 0253-987X(2024)12-0078-11

## Research on Heat Exchange Capacity Attenuation Characteristics of Air-Cooled Heat Exchange Systems for Converter Transformers under the Influence of Environmental Winds

YANG Yao<sup>1</sup>, LI Zaoyang<sup>1</sup>, WANG Junlan<sup>1</sup>, LUO Jinping<sup>1</sup>, LIU Lijun<sup>1</sup>,  
ZHAO Xinyang<sup>2</sup>, CHEN Haoyang<sup>2</sup>, YANG Chen<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Ultra-High Voltage Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** In order to achieve a rational design of the heat exchange capacity of cooling systems for converter transformers and ensure their safe and stable operation, the attenuation characteristics of heat exchange capacity of air-cooled heat exchange systems for converter transformers under the influence of environmental winds are investigated. For a converter transformer in a northern converter station, a three-dimensional numerical analysis model of heat transfer flow, incorporating factors like air-cooled heat exchanger, fan, firewall, and environmental wind, is established using a method that combines large-scale heat transfer in the air-cooled heat exchange system with small-scale heat calculation of finned

收稿日期: 2024-06-01。 作者简介: 杨焱(2000—), 男, 硕士生;李早阳(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。

基金项目: 宁夏自然科学基金资助项目(2021AAC03506);国网宁夏电力有限公司科技资助项目(5229CG20006F)。

网络出版时间: 2024-08-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240822.0738.002>

tube bundles. The negative influence mechanisms of environmental wind direction and wind speed on the heat exchange capacity of the air-cooled heat exchange systems are examined to determine the attenuation characteristics of the heat exchange capacity under the real environmental conditions. The results show that under the headwind, the volumetric flow rate into the heat exchanger significantly decreases with increasing wind speed, with a slight drop in inlet air temperature, maintaining heat exchange efficiency between 66.01% and 66.75% across various wind speeds; under the crosswind, the windward firewall hinders airflow, causing the heat exchange efficiency to vary between 55.98% and 83.13% as wind speed rises, reaching its lowest point at an environmental wind speed of 6 m/s; under the tailwind, environmental winds aligning with fan outflow intensify heat recirculation near the heat exchanger, resulting in heat exchange efficiency varying between 50.96% and 91.46% with increasing wind speed, reaching its lowest at an environmental wind speed of 9 m/s. The research results provide valuable references for designing the heat exchange capacity of air-cooled heat exchange systems for converter transformers.

**Keywords:** converter transformers; air-cooled heat exchange system; windy conditions; heat exchange capacity

高压直流输电在西电东送电力远距离输送中扮演着十分重要的角色<sup>[1]</sup>。换流变压器作为高压直流输电换流站中的关键设备,其安全稳定运行对于电网的稳定可靠意义重大。换流变压器在运行过程中会产生大量的热量,为保障换流变压器正常运行,需配备特定的换热系统及时带走变压器产生的热量并维持其在许可温度范围内安全运行<sup>[2]</sup>。在我国西北等水资源相对匮乏地区,空冷换热系统常被作为换流变压器的冷却设备<sup>[3]</sup>。由于直接与周围环境进行通风散热,空冷换热系统的换热能力容易受到环境风的影响。

针对环境风影响下空冷换热系统的换热能力,一些研究者采用实验或数值模拟方法开展了相关研究。在实验研究方面,文献[4-5]采用风洞模型实验,发现环境风会加剧空冷换热系统的热风回流。罗智凌等<sup>[6]</sup>通过实验得到不同环境风速下的风机容积效率曲线,为空冷换热系统风机群的节能运行提供参考。在数值模拟方面,一些学者研究了环境风向及风速<sup>[7-17]</sup>影响下空冷换热系统换热性能的变化规律。Duvénhage 等<sup>[11]</sup>指出,环境风会减少风机的进风量,也会加剧换热器的热风回流,进而使得换热器换热性能下降。Liu 等<sup>[14]</sup>讨论了不同风向风速下空冷换热系统热风回流的情况,并提出了增加风墙高度和增强空冷换热器平台边缘风机转速的应对策略。刘学等<sup>[17]</sup>发现,存在环境风时建筑物的扰流作用对空冷换热系统流动换热性能有不利影响。为了改善环境风带来的负面影响,一些研究者提出了空冷换热系统的优化方案,包括新型的空冷换热器布置方式<sup>[18-19]</sup>、导流板<sup>[20]</sup>以及合理调控风机<sup>[21-22]</sup>等,

从而改善空冷换热系统的换热性能。上述研究表明,环境风对空冷换热系统换热能力的负面影响显著,因而在进行换热容量设计时,应该充分考虑各地的地理气候条件。虽然目前已存在环境风对空冷换热系统换热性能影响的研究,但相关研究侧重于空冷换热系统水平布局下环境风对其换热效果的影响研究,主要应用场景为火力发电厂<sup>[6]</sup>,而针对换流变压器垂直布局的空冷换热系统的研究是有限的,不同应用场景及不同布局形式下环境风的作用规律是不一致的,需要有针对性的开展深入研究。

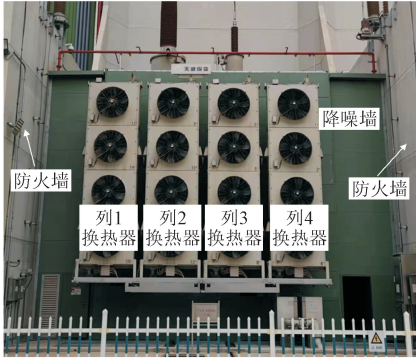
本文以某高压直流输电换流变压器空冷换热系统为研究对象,建立能够描述空冷换热系统通风散热的三维数值分析模型,研究环境风向及风速对换热系统换热能力的负面影响机制,揭示真实环境条件下换热系统换热能力的衰减特性,为换流变压器空冷换热系统的设计和运维提供参考依据。

## 1 数值建模

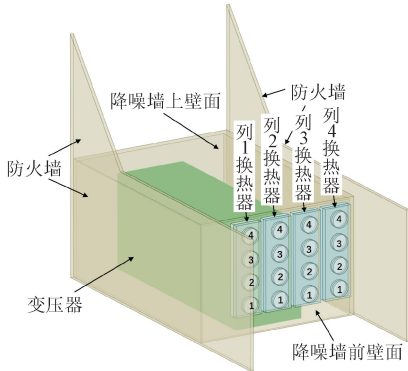
### 1.1 换流变压器空冷换热系统

换流变压器及空冷换热系统如图 1 所示,可知在变压器本体及空冷换热系统的左右两侧各设置了一堵防火墙,且在变压器本体外侧设置降噪墙以减少运行噪音对外部环境的影响。换流变压器的空冷换热系统由 4 列空冷换热器垂直并联组成,每列换热器均有 4 个规格相同的风机置于换热器前侧,通过风机抽吸在换热器背部形成负压并从外部环境吸入空气,使周围气流穿过换热管束从而对管束内部的变压器循环油进行冷却。每列空冷换热器的尺寸为 5.6 m×1.7 m,相邻两列换热器之间的间隙为

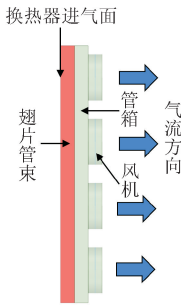
0.3 m,每列空冷换热器包含 4 台直径为 1 m 的风机。建立模型时,尽可能全面地考虑了换热器风机、管箱、肋管等各组件及变压器周围防火墙、降噪墙等围挡结构的影响。图 1(d)中翅片管束的参数如下:翅片管束高度为 5.6 m,宽度为 1.7 m,翅片管束区域厚度为 0.3 m,管束间距为 38 mm,翅片管束外径  $D$  为 16.7 mm,翅片厚度为 0.8 mm,翅片管束共 6 排,每排 39 根。



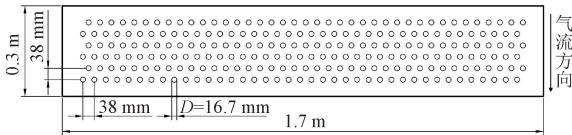
(a)空冷换热系统实物图



(b)空冷换热系统模型图



(c)空冷换热器示意图



(d)翅片管束横截面俯视图

图 1 空冷换热系统

Fig. 1 Air-cooled heat exchange system

1.2 换热过程数值计算方法及边界条件

采用压力和速度耦合的 SIMPLE 算法对空冷换热系统的流动换热进行模拟分析,湍流模型采用在建筑室外风环境中被广泛使用的标准  $k-\epsilon$  模型<sup>[20]</sup>。

1.2.1 控制方程

数值建模中考虑的空气流动控制方程包括连续性方程、Navier-Stokes 动量守恒方程及能量守恒方程。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + S_i \tag{2}$$

能量方程

$$\rho c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \tag{3}$$

式中:  $u_i$  为  $i$  方向的速度,  $i$  为坐标系的 X、Y、Z 方向;  $T$  为温度;  $\rho$  为空气密度;  $p$  为压力;  $g_i$  为重力加速度;  $\mu$  为黏性系数;  $c_v$  为比定容热容;  $k$  为有效导热系数;  $S_i$ 、 $S_h$  为动量源项、热量源项。

1.2.2 换热器翅片管束设置

空冷换热器翅片管束采用了文献[23]提出的多孔介质模型,模拟空气流过换热器管束的压降及换热过程,并在多孔介质模型中限定空气流动方向。此模型是在动量方程中引入了一个动量源项  $S_i$  充当阻力,源项  $S_i$  表达式为

$$S_i = -\frac{\Delta p}{\Delta n} = -\left( D_i \mu u_i + \frac{1}{2} C_i \rho |u_i| u_i \right) \tag{4}$$

式中:  $\Delta p$  为空气流过换热器管束的压降;  $\Delta n$  为多孔介质的厚度;  $D_i$  为  $i$  方向的黏性阻力系数;  $C_i$  为  $i$  方向的惯性阻力系数;  $u_i$  为  $i$  方向的速度。

采用换热器设计计算软件 HTRI 模拟计算得到换热器翅片管束的阻力特性数据<sup>[24]</sup>,最终得到垂直于风机进口平面方向的  $C_i = 13.9917 \text{ m}^{-1}$ 、 $D_i = 567963 \text{ m}^{-2}$ 。在计算时,翅片管束内被冷却介质和管束外空气的换热量是一致的,当环境风使得管束外空气的换热量降低时,管内被冷却介质的换热量也随之降低。假设在一定时间内进入换流变压器空冷换热系统的被冷却介质温度和流量保持不变,则空气流过换热器翅片的换热量仅与进入换热器的空气流量和温度相关。换热量以体热源的形式加载到模型中的换热器翅片管束多孔介质部分。空冷换热器的换热量与图 1(c)中换热器进气面的进风量  $q$ 、平均进气温度  $t_{in}$  之间的关系通过 HTRI 计算并拟

合,具体为

$$Q = 2.586 \times 10^5 + 3.194 \times 10^4 q - 8\,297 t_{in} - 202.4 q^2 - 472 q t_{in} + 28.33 t_{in}^2 \quad (5)$$

由式(5)中空冷换热器的换热量  $Q$  除以翅片管束区域(多孔介质区域)的体积可得到式(3)能量方程中热量源项  $S_h$ 。

1.2.3 风机设置

将风机简化为二维平面,根据风机的性能曲线得到风机平面压降的关系

$$\Delta P = b_1 v^2 + b_2 v + b_3 \quad (6)$$

式中:  $b_1 = -1.64$ 、 $b_2 = 10.04$ 、 $b_3 = 130.4$  为多项式系数;  $v$  为空气穿过风机平面的速度。

1.2.4 环境风向风速选取

换流变压器处于室外环境,面临的风向风速复杂多变。考虑到换流变压器及其相临建筑物的几何对称性,并使研究结果具有代表性,本文选取了 5 个特征风向,变压器俯视图如图 2 所示。来风方向相对变压器分别为正前方风向 1、侧前方风向 2、侧方风向 3、侧后方风向 4 和正后方风向 5,其中相邻两个风向之间的夹角为  $45^\circ$ 。根据换流站所在地区气象资料选取  $0 \sim 12 \text{ m/s}$ <sup>[25]</sup> 作为环境风速的典型变化范围,该范围在我国北方地区具有典型代表性。计算时选取环境风速为 0、3、6、9、12 m/s,研究风向、风速对空冷换热系统换热能力的影响规律,其中风速 0 m/s 代表无环境风条件。

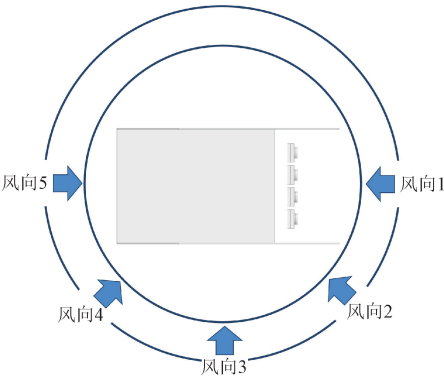


图 2 5 种环境风向示意图

Fig. 2 Five types of environmental wind directions

1.2.5 计算域边界条件

研究环境风对空冷换热系统换热能力的影响时,选取的计算区域大小要与换流变压器及其围挡的尺寸相匹配。选取的计算域如图 3 所示,为保证计算结果的合理性,将计算域的尺寸确定为  $200 \text{ m} \times$

$200 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ <sup>[26]</sup>,不同风向下最大的阻塞率为 0.89%,满足要求。无环境风时,计算域外围采用压力边界代表大气环境;有环境风时,来流风向面采用速度边界条件,与来流相对的出流面设置为压力出口面,与来流风向平行的面采用对称边界条件;换热器壳体与周围建筑视为无滑移壁面,地面为恒温壁面。选取环境温度为  $20^\circ\text{C}$ ,计算域表面与地面温度均为  $20^\circ\text{C}$ ,以代表典型环境温度条件。

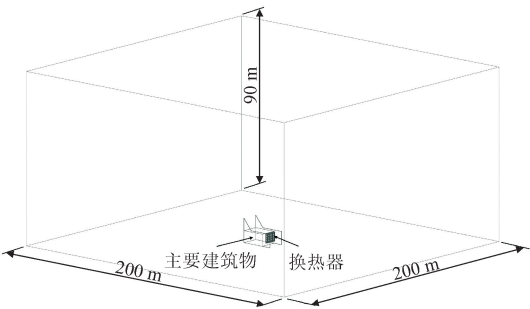


图 3 本文选取的计算域

Fig. 3 Computational domain

在不同高度位置处,环境风速会有差别,为了更加准确地模拟实际情况,采用风速廓线来描述环境风速的分布规律<sup>[16]</sup>,并作为来流风向面的速度边界条件,即

$$v = v_0 (z/10)^a \quad (7)$$

式中:  $v$  为与地面垂直距离  $z$  处的风速;  $v_0$  为与地面垂直距离为 10 m 处的风速,具体取值对应前述 0、3、6、9、12 m/s 的风速条件;  $z$  表示距离地面的垂直高度;  $a = 0.16$  为换流变压器所处地区的地面粗糙度<sup>[27]</sup>。根据上式获得的环境风速为 3 m/s 时距地面不同高度的风速分布如图 4 所示。

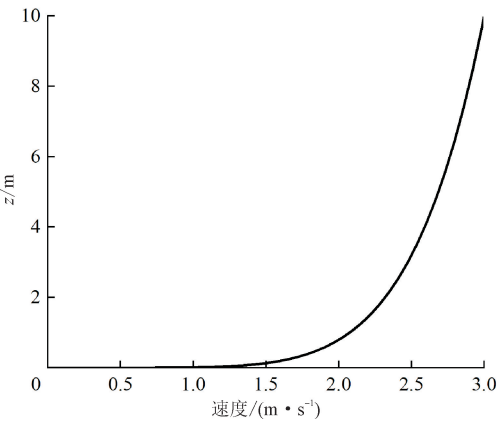


图 4 环境风速为 3 m/s 时不同高度处风速分布

Fig. 4 Distribution of wind speed at different heights when the environmental wind speed is 3 m/s



1.3 网格无关性验证与模型验证

本文在划分网格时对空冷换热器主体及防火墙、降噪墙等各个壁面处进行网格加密,空冷换热系统的不同部位采用大小不同的网格,共建立了 7 套网格模型。当环境风速 0 时,得到不同网格数下空冷换热系统总换热量。不同网格数下空冷换热系统的总换热量如图 5 所示,当网格数从 1 210 万增加至 1 359 万时,总换热量的变化为 0.05%,最终采用 1 210 万网格方案,空冷换热器网格如图 6 所示。

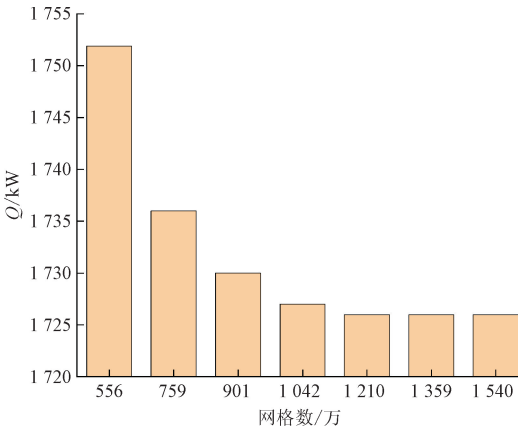


图 5 不同网格数下空冷换热系统的总换热量  
Fig. 5 Total heat exchange capacity of the air-cooled heat exchange system under different grid numbers

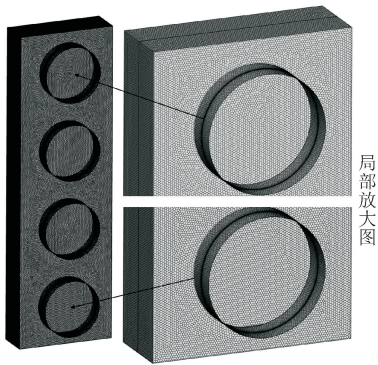


图 6 空冷换热器网格  
Fig. 6 Calculation grid for air-cooled heat exchangers

为验证数值模型的准确性,选取侧方风向 3 下,风速为 0、3 m/s 时的两种工况进行换热量模拟计算,并与实时监测的换流变压器换热量数据进行对比,对比结果如表 1 所示,可知模拟结果与实测数据误差在 5% 以内,验证了本文所建数值模型的准确性。

表 1 侧方风向 3 下数值模拟结果与实验结果对比

Table 1 Comparisons of experimental and numerical results under wind direction 3

| 风速/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) | 换热量<br>实测值/kW | 换热量<br>模拟值/kW | 换热量<br>误差/% |
|-----------------------------|---------------|---------------|-------------|
| 0                           | 1 653.8       | 1 726.1       | 4.37        |
| 3                           | 1 370.7       | 1 434.9       | 4.68        |

1.4 空冷换热系统换热性能评价指标

环境风对空冷换热系统的影响主要体现在风机的总进风体积流量、平均进气温度、换热器的总换热量 3 个方面,进风量增大或进气温度降低均有利于提升换热量。本文通过这 3 个变量对空冷系统换热性能进行评价,并引入换热效率这一指标,具体定义为

$$\gamma = \frac{Q}{Q_0} \times 100\% \tag{8}$$

式中:Q、Q<sub>0</sub> 分别为空冷换热系统在有风和无风环境下的换热量;γ 为在有风环境下空冷换热系统的换热效率。

2 结果与讨论

采用上述建立的三维数值分析模型,详细研究了环境风向、风速对空冷换热系统进风体积流量、平均进气温度以及总换热量的影响规律,并获得了环境风影响下空冷换热系统换热能力的衰减特性。

2.1 环境风影响下空冷换热系统换热能力衰减特性

不同环境风向下空冷换热系统的总换热量分布情况如图 7 所示。风速为 0 时,空冷换热系统的总换热量为 1 726.1 kW,在各个风向与风速影响下换热量均低于该数值,表明环境风导致换流变压器空冷换热系统的换热能力衰减,已有研究中水平布局<sup>[7-9]</sup>的空冷换热系统也有类似的规律。文献<sup>[7]</sup>以水平布局的 600 MW 火电空冷系统为对象,研究了环境风向及风速对空冷系统的影响,结果表明,环境风通过影响空冷系统进气面温度和进风量,进而影响换热量,并指出存在环境风时空冷系统的换热量会下降。侯忠诚等<sup>[9]</sup>研究了夏季主导南向风下环境风速对水平布局的换流站换流阀空冷平台换热能力的影响,指出存在环境风时其换热能力均会衰减。在不同环境风向下,随着环境风速的上升空冷换热系统换热量有不同的

变化规律。在正前方风向 1 与侧前方风向 2 下,当环境风速从 3 m/s 上升至 12 m/s 时,空冷换热系统的换热量受风速变化影响不显著,但这两个风向下空冷换热系统换热性能衰减整体比较严重。在其他 3 个风向下,风速的变化对空冷换热系统换热量的影响较大,当环境风速从 3 m/s 上升至 12 m/s 时,换热量变化趋势都为先降低后升高。在常识性认知中,环境风吹过换热器表面会强化换热,且环境风速越大换热效果越好,这对于没有风机驱动仅有环境风自然流过换热器的情况是合理的。在风机强吹换热器的情况下,环境风的存在能够增加风机进风阻力,使得换热器进风量下降,同时引发热风回流使得换热器进气温度升高,这些都会导致换热器的换热性能衰减。

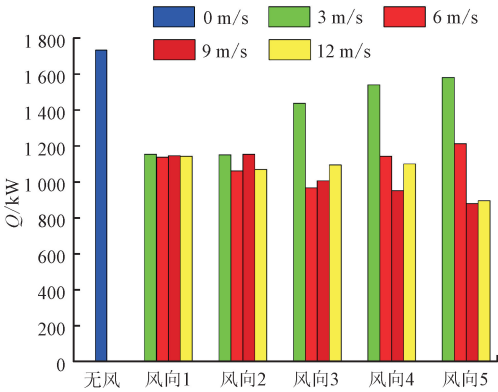


图 7 不同环境风下空冷换热系统的换热量  
Fig. 7 Heat exchange capacity of the air-cooled heat exchange system under different environmental wind conditions

结合图 7,可得不同风向风速下空冷换热系统的换热效率,如图 8 所示。由图 8 可知,随着环境风速变化,正前方风向 1 下换热效率变化范围为 66.01%~66.75%,侧前方风向 2 下换热效率变化范围为 61.38%~66.77%,侧方风向 3 下换热效率变化范围为 55.98%~83.13%,侧后方风向 4 下换热效率变化范围为 55.04%~89.14%,正后方风向 5 下换热效率变化范围为 50.96%~91.46%。由风向 1 向风向 5 变化过程中,同一风向不同风速换热效率的差异显著增大,其中正后方风向 5 下风速为 9 m/s 时,换热效率最低为 50.96%,相应换热量仅为 879.7 kW,该风向下风速 3 m/s 时换热效率最高为 91.46%,相应换热量为 1 578.8 kW。

随着环境风速增加,正前方风向 1 与侧前方风向 2 下换热效率基本保持不变;侧后方风向 4 与正后方风向 5 下换热效率先下降后上升,风速 9 m/s 时换热效率最低;侧方风向 3 下换热效率也呈现先下降后上升趋势,但在风速 6 m/s 时最低。同时,正前方风向 1 与风机出流风向相反,侧方风向 3 与风机出流风向垂直,正后方风向 5 与风机出流风向相同。因此,将以正前方风向 1、侧方风向 3 和正后方风向 5 为典型代表,深入分析导致空冷换热系统换热能力衰减的原因。

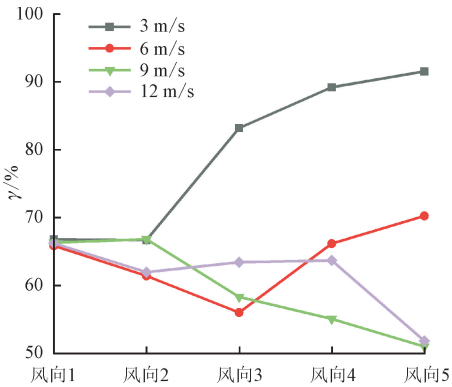
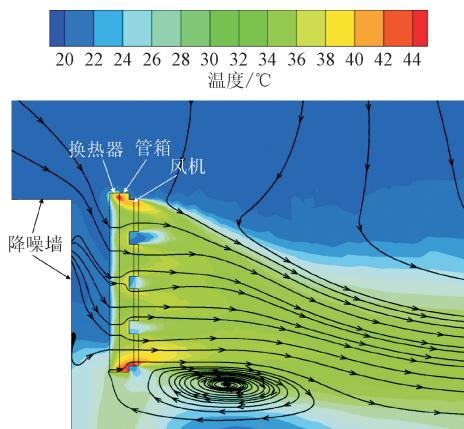


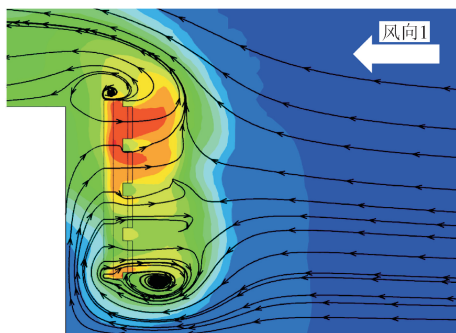
图 8 不同风向风速下空冷换热系统的换热效率  
Fig. 8 Heat exchange efficiency of the air-cooled heat exchange system under different environmental wind conditions

2.2 正前方风向下空冷换热系统换热能力衰减特性

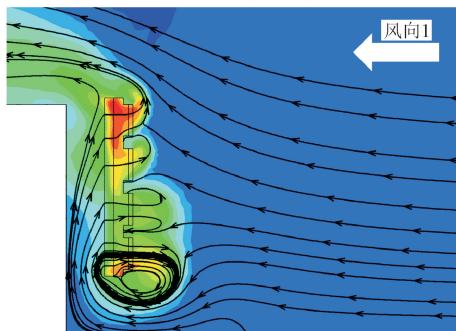
当环境风按图 2 所示风向 1 由变压器正前方吹来时,风向与风机出流风向相反。该风向不同风速下空冷换热系统列 1 换热器中间截面的温度流线分布如图 9 所示,当环境无风即风速为 0 时,由图 9(a)可以看出,在风机的作用下气流从左向右流经换热器,在换热器底部出现回流。当环境风速上升到 6 m/s 时,由图 9(b)可以看出,环境风向与风机出流风向相反,热风从风机流出一段距离之后,被环境风夹带回到换热器附近形成热风回流,换热器截面处高温区域明显变大。当环境风速由 6 m/s 上升到 12 m/s 时,由图 9(c)可以看出,从风机吹出来的热风与环境风发生剧烈冲撞,环境风带走大量热风使得换热器截面处高温区域减小。由于环境风最终把热风携带至换热器上方,故此风向下列 1 换热器上部始终为高温区域。



(a) 风速为 0



(b) 风速为 6 m/s



(c) 风速为 12 m/s

图 9 正前方风向 1 下列 1 换热器中间截面的温度流线分布  
Fig. 9 Streamline and temperature contour in the middle section of heat exchanger 1 under wind direction 1

图 9 中的流动状态及温度分布直接影响空冷换热系统的换热能力。为进一步研究正前方风向 1 影响下空冷换热系统换热能力随风速的变化规律,统计了不同风速下换热器的总进风体积流量、平均进气温度和总换热量,如图 10 所示。由图 10 可知,当环境风速由 0 上升至 12 m/s 时,空冷换热系统进风量一直下降,这是因为风机进气方向与正前方风向 1 相反,此风向会增大风机的进气阻力,平均进气温度随风速增加先上升后缓慢下降,总换热量则先下

降后略微上升。具体而言,环境风速由 0 增加至 6 m/s 时,从风机流出的热风被环境风携带至换热器附近形成热风回流,在总进风量下降的同时平均进气温度上升,导致总换热量下降、换热性能恶化。在环境风速为 6 m/s 时,平均进气温度最高为 34.22℃,总换热量最低为 1 139.8 kW,换热效率为 66.01%。风速由 6 m/s 上升至 12 m/s 时,尽管进风量持续下降,但环境风带走更多热空气,使得平均进气温度下降,总换热量有所上升,这表明进气温度下降引起的换热性能提升要强于进风量下降引起的换热性能衰减。

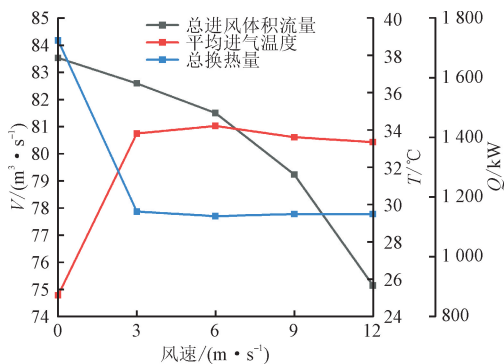


图 10 正前方风向 1 下空冷换热系统的换热性能  
Fig. 10 Heat exchange performance of the air-cooled heat exchange system under wind direction 1

### 2.3 侧方风向下空冷换热系统换热能力衰减特性

当环境风按图 2 所示风向 3 由变压器侧方吹来时,环境风向与风机出流风向垂直,不同风速下空冷换热系统进气面的温度流线分布如图 11 所示。由图 11(a)可以看出,当无环境风即风速为 0 时,风机从变压器上方大气吸气与换热器进行换热。当环境风速上升至 6 m/s 时,由图 11(b)可以看出,环境风碰撞到迎风侧防火墙后在其下部形成回流涡旋,部分环境风绕过迎风侧防火墙,流经换热器上部,在背风侧防火墙后部形成回流涡旋。由于列 1 换热器紧挨迎风侧防火墙并被阻挡,风机无法从上方充分吸入环境风有效换热,使得其进气面温度明显升高。当环境风速继续上升至 12 m/s 时,由图 11(c)可以看出,流经列 1 换热器的环境风更容易带走部分热风,使得换热器进气面的温度降低、高温区域缩小,此时迎风侧和背风侧防火墙处所形成的涡旋进一步增强。



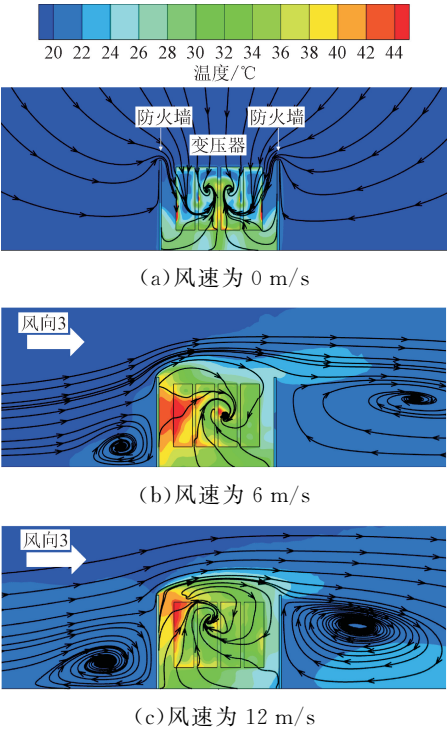


图 11 侧方风向 3 下空冷换热系统进气面的温度流线分布  
Fig. 11 Streamline and temperature contour in the inlet section of the air-cooled heat exchange system under wind direction 3

不同环境风速下空冷换热系统的总进风体积流量、平均进气温度和总换热量如图 12 所示,可知随着环境风速上升,迎风侧防火墙的阻挡作用以及环境风向垂直进气方向,使得风机进气阻力增加、进风体积流量持续下降,平均进气温度先上升后下降,总换热量则呈现先下降后上升的趋势。环境风速为 6 m/s 时,空冷换热系统的平均进气温度达到最高值 35.73 °C,此时总换热量 966.2 kW 最低,换热效率为 55.98%。环境风速由 6 m/s 上升至 12 m/s 时,空冷换热系统进风体积流量继续下降,但由于环境风速上升,使得平均进气温度下降,总换热量上升。

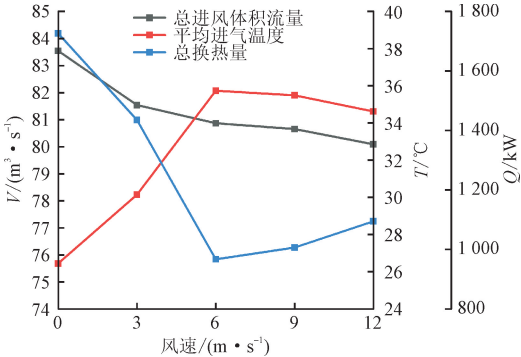


图 12 侧方风向 3 下空冷换热系统的换热性能  
Fig. 12 Heat exchange performance of the air-cooled heat exchange system under wind direction 3

2.4 正后方风向下空冷换热系统换热能力衰减特性

当环境风按图 2 所示风向 5 由变压器正后方吹来时,环境风向与风机出流风向相同。不同风速下空冷换热系统列 1 换热器中间截面的温度流线分布如图 13 所示。由图 13(a)可知,当无环境风即风速为 0 m/s 时,风机从换流变压器上方大气吸气从而与空冷换热器进行换热。由图 13(b)可知,正后方风向 5 下环境风速 6 m/s 时,部分环境风被换热器上部风机吸入,此时换热器上部温度相对较低,而换热器下部热风回流明显加剧,温度相应升高。由图 13(c)可知,当环境风速上升至 12 m/s 时,热风回流现象进一步增强,换热器的温度持续升高。

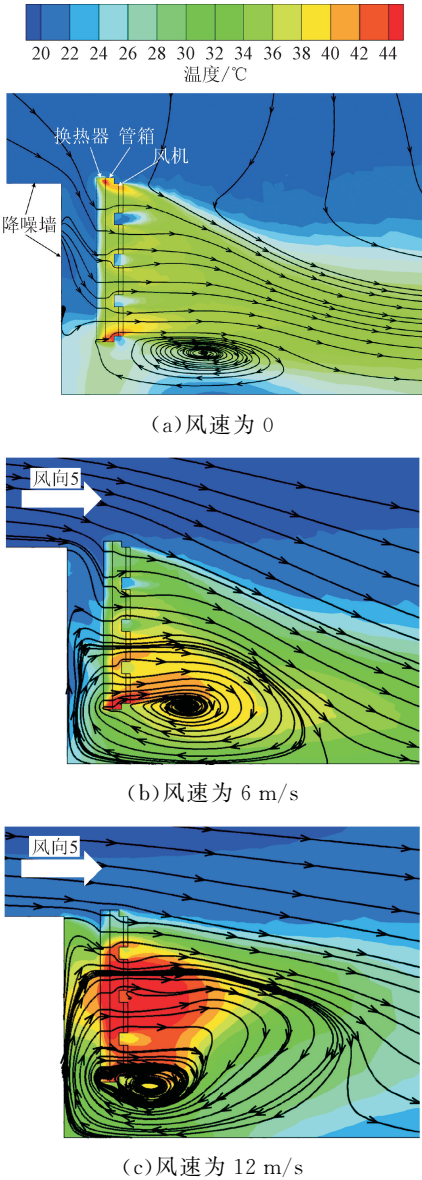


图 13 正后方风向 5 下列 1 换热器中间截面的温度流线分布  
Fig. 13 Streamline and temperature contour in the middle section of heat exchanger 1 under wind direction 5



不同风速下空冷换热系统的总进风体积流量、平均进气温度和总换热量如图14所示。由图14可知:正后方风向5下,随着环境风速上升,空冷换热系统进风体积流量先下降后趋于平稳;平均进气温度先升高再略有降低,总换热量先下降后略微升高;环境风速为9 m/s时,空冷换热系统的平均进气温度达到最高,为37.68℃,总换热量最低为879.7 kW,换热效率为50.96%。

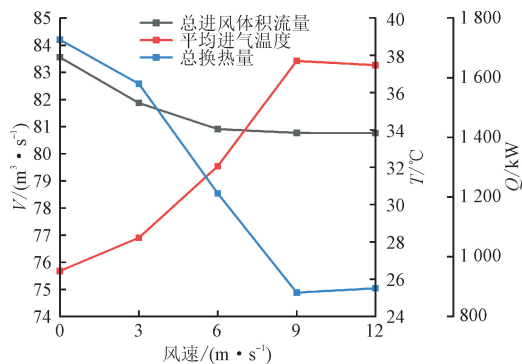


图14 正后方风向5下空冷换热系统的换热性能

Fig. 14 Heat exchange performance of the air-cooled heat exchange system under wind direction 5

## 2.5 空冷换热系统换热能力衰减与换热容量设计

对比图9、图11、图13可知,不同风向、风速下空冷换热器附近的空气流动状态和温度分布差明显,这些也影响着换热能力。对比图10、图12、图14可知,正前方风向下,换热器总进风体积流量随风速增大而衰减显著,平均进气温度随风速增加而略有变化,在进气温度主导换热能力的情况下总换热量随风速增加变化不显著。随着风向朝侧方和后方转变时,总进风体积流量随风速增大而衰减的趋势逐渐减弱,总进气温度先增加后降低、变化幅度较大,这使得总换热量先下降后上升、也呈现大幅变化。

为了保障换流变压器的安全稳定运行,在进行空冷换热系统换热容量设计时需留有裕度。由本研究可知,环境风影响下空冷换热系统的换热效率会显著降低,但在设计换热容量时往往难以充分考虑环境风引起的换热效率衰减问题,极易导致换流变压器温度过高,影响运行安全,这在当前运行的换流站中也是真实存在的问题。假设该空冷换热系统换热容量为无环境风时的1726.1 kW,当变压器处于不同地区、盛行风由正前方风向1向正后方风向5改变时,最低换热效率分别为66.01%、61.38%、55.98%、55.04%和50.96%,相应的最大设计换热容量分别为2614.9、2812.2、3083.4、3136.1、

3387.2 kW,这些结果为空冷换热系统换热容量设计提供了参考。

## 3 结 论

本文建立了换流变压器空冷换热系统三维数值分析模型,研究了环境风向风速对空冷换热系统换热能力的负面影响机制,得到如下结论。

(1)环境风导致空冷换热系统的换热能力衰减严重,不同风向风速下换热器进风体积流量下降和进气温度上升是换热系统换热能力下降的根本原因,其中进气温度的改变是影响换热能力的主导因素。

(2)正前方风向下,环境风向与风机出流风向相反,使得换热器进风体积流量随环境风速的增加而衰减明显,进气温度则呈现轻微下降趋势,使得不同风速下换热效率维持在66.01%~6.75%之间。

(3)侧方风向下,迎风侧防火墙对气流流动的阻碍作用,使得列1换热器换热性能恶化最严重,换热器总进风体积流量随风速增加而所有下降,平均进气温度呈现先升高后降低的趋势,使得换热效率在55.98%~83.13%之间变化,其中环境风速为6 m/s时换热效率最低,此时总换热量为966.2 kW。

(4)正后方风向下,尽管环境风向与风机出流方向相同,但风机进风体积流量没有增加,反而呈现一定的下降趋势,大的风速会造成换热器附近强烈的热风回流,使得进气温度上升明显,换热效率在50.96%~91.46%之间变化,其中环境风速9 m/s时换热效率最低,此时总换热量仅为879.7 kW。

## 参考文献:

- [1] 彭吕斌,何剑,谢开贵,等. 特高压交流和直流输电系统可靠性与经济性比较[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1098-1105.
- PENG Lübin, HE Jian, XIE Kaigui, et al. Comparison of reliability and economy between UHVAC and UHVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1098-1105.
- [2] 许巧云,王渝淇,杜文娇,等. 一起换流变压器油箱局部过热分析与维修[J]. 变压器, 2021, 58(7): 83-87.
- XU Qiaoyun, WANG Yuqi, DU Wenjiao, et al. Analysis and maintenance of partial overheat of a converter transformer oil tank [J]. Transformer, 2021, 58(7): 83-87.
- [3] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中

- 国电力出版社, 2011.
- [4] 赵万里, 刘沛清. 环境风对直接空冷系统塔下热回流影响的试验研究 [J]. 动力工程, 2008, 28(3): 390-394.
- ZHAO Wanli, LIU Peiqing. Experimental researches of the effect of environmental wind on thermal recirculation under the tower of direct air cooled system [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 390-394.
- [5] GU Zhifu, LI Hui, ZHANG Wenhong, et al. Wind tunnel simulation on re-circulation of air-cooled condensers of a power plant [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(6): 509-520.
- [6] 罗智凌, 姚琦, 刘吉臻. 直接空冷系统风机群入口流量特性实验研究 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(10): 1294-1302.
- LUO Zhiling, YAO Qi, LIU Jizhen. Experimental study on inlet flow performance of fan array in the direct air-cooling system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(10): 1294-1302.
- [7] 郑春波. 环境风影响下直接空冷系统流动传热特性分析[D]. 长春: 东北电力大学, 2020.
- [8] 高沛, 张学镭. 环境风对直接空冷凝汽器性能的影响及主导因素分析 [J]. 中国电力, 2013, 46(11): 113-118.
- GAO Pei, ZHANG Xuelei. Performance of direct air-cooled condenser under windy conditions and its influencing factors [J]. Electric Power, 2013, 46(11): 113-118.
- [9] 侯忠诚, 南晓红, 李早阳, 等. 环境风影响下高压直流输电换流阀空冷平台换热性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 122-130.
- HOU Zhongcheng, NAN Xiaohong, LI Zaoyang, et al. Study on heat transfer characteristics of air-cooled platform of high-voltage DC converter valve under windy conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 122-130.
- [10] 陈昊阳, 赵欣洋, 潘亮亮, 等. 环境风影响下换流变压器空冷系统换热性能研究 [J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 109-114.
- CHEN Haoyang, ZHAO Xinyang, PAN Liangliang, et al. Research on heat transfer performance of air-cooled system of converter transformer under windy conditions [J]. Turbine Technology, 2023, 65(2): 109-114.
- [11] DUVENHAGE K, KRÖGER D G. The influence of wind on the performance of forced draught air-cooled heat exchangers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62(2/3): 259-277.
- [12] 戴振会. 直接空冷凝汽器侧风下流动和换热特性的数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [13] 刘志远, 潘亮亮, 杨晨, 等. 环境风影响下换流阀空冷平台换热性能提升研究 [J]. 热科学与技术, 2023, 22(5): 438-445.
- LIU Zhiyuan, PAN Liangliang, YANG Chen, et al. Study on heat transfer performance enhancement of air-cooled converter valve platform under windy conditions [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2023, 22(5): 438-445.
- [14] LIU Peiqing, DUAN Huishen, ZHAO Wanli. Numerical investigation of hot air recirculation of air-cooled condensers at a large power plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 1927-1934.
- [15] YANG L J, DU X Z, YANG Y P. Space characteristics of the thermal performance for air-cooled condensers at ambient winds [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(15/16): 3109-3119.
- [16] YANG L J, DU X Z, YANG Y P. Wind effect on the thermo-flow performances and its decay characteristics for air-cooled condensers in a power plant [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 175-187.
- [17] 刘学, 李国栋, 张瑞颖, 等. 环境风作用下小规模直接空冷系统流动传热性能分析 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 106-112.
- LIU Xue, LI Guodong, ZHANG Ruiying, et al. Analysis of flow and heat transfer performances of small-scale direct dry cooling system under ambient wind [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(6): 106-112.
- [18] KONG Yanqiang, WANG Weijia, HUANG Xianwei, et al. Circularly arranged air-cooled condensers to restrain adverse wind effects [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 202-223.
- [19] JIN Ruonan, YANG Xiaoru, YANG Lijun, et al. Square array of air-cooled condensers to improve thermo-flow performances under windy conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(part A): 717-729.
- [20] ZHANG Xuelei, WU Tingting. Effects of diffuser orifice plate on the performance of air-cooled steam condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 179-188.
- [21] HE Weifeng, DAI Yiping, HAN Dong, et al. Influence from the rotating speed of the windward axial fans on the performance of an air-cooled power plant [J].

- Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1/2): 14-23.
- [22] HE W F, CHEN J J, HAN D, et al. Numerical analysis from the rotational speed regulation within the fan array on the performance of an air-cooled steam condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 352-360.
- [23] BATALHA L G, SUAIDEN K T, DE ANDRADE M R. Assessment with computational fluid dynamics of the effects of baffle clearances on the shell side flow in a shell and tube heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 497-506.
- [24] PATANKAR S V, SPALDING D B. Heat exchangers: design and theory sourcebook [M]. New York, USA: Graw-Hill Book Company, 1974: 155-176.
- [25] 宋芳婷, 诸群飞, 吴如宏, 等. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [C]//全国暖通空调制冷 2006 学术年会资料集. 合肥: 中国制冷学会, 2006: 264.
- [26] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 1749-1761.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- (编辑 赵炜 陶晴)