

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.014

## 基于辐射降温方式的特高压户内直流场电抗器冷却效果研究

林真国<sup>1</sup>, 黄媛<sup>1</sup>, 彭喆<sup>2</sup>, 王德之<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆赛迪热工环保工程技术有限公司, 重庆 401147)

**摘要:** 直流场内电抗器散热是影响特高压技术发展的热点问题。为解决传统送风方式能耗大、降温不均匀以及尘埃飞扬等问题,从电抗器特性以及室内环境调控角度出发,文中提出了一种新型辐射板降温方法,并以广州某±800 kV特高压直流场为例,对电抗器辐射板进行结构优化设计,利用Fluent软件模拟研究了辐射板放置位置对特高压直流场的降温冷却效果,研究表明:辐射板放置距离在500 mm以内的效果更显著;内置辐射板比外置辐射板对电抗器冷却降温效果更好;内外兼置的辐射板放置方式综合效益不显著。

**关键词:** 特高压直流场; 电抗器; 热环境; 辐射降温

### Study on the Cooling Effect of UHV Indoor DC Field Reactor Based on Radiative Cooling Method

LIN Zhenguo<sup>1</sup>, HUANG Yuan<sup>1</sup>, PENG Zhe<sup>2</sup>, WANG Dezhi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing CISDI Thermal Engineering Engineering Technology Co., Ltd., Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The heat dissipation of reactors in DC field is a hot issue affecting the development of UHV technology. For solving such issues in traditional problems as large energy consumption, uneven cooling and dust flying associated with traditional air supply methods and starting from the perspective of the characteristics of reactor as well as indoor environment regulation and control, a novel radiation plate for cooling method is proposed in this paper. A ±800 kV UHV DC field in Guangzhou is taken as an example, the structural optimization design of the radiation plate of the reactor is performed and the Fluent software is used to simulate and study the cooling effect of radiation plate placement position on the UHV DC field. The study shows that the effect is more significant with the radiation plate within 500 mm. The cooling effect of the internal radiation plate to the reactor is better than that of external radiation plate. However, the combined effect of the internal and external placement of radiation plate is not significant.

**Key words:** UHV DC field; reactor; thermal environment; radiation cooling

## 0 引言

国家“双碳”<sup>[1]</sup>战略中,电力“新基建”为解决环境问题贡献重要力量<sup>[2]</sup>,特高压直流场内环境调控技术也愈受关注。长期以来,随着中国经济增长,供给侧用电量和规模迅猛发展,2020年全社会用电量7.5万亿kW/h,预计2060年将比2020年增加15亿kW左右<sup>[3]</sup>,用电规模仍在继续扩大,但中国电力总体格局呈“超远距离、超大容量、超高能耗”<sup>[4]</sup>,资源分配存在明显不平衡现象,特高压跨区域输电

新基建正是实现这种能源、资源、环境优化配置的重要手段。其中,特高压换电站环境调控技术对整体输电工程的安全、稳定和高效运行起着重要保障作用。

在特高压直流场中,热环境调控是需要解决的首要问题,过高的温度和温度梯度严重影响电力设备的准确性、绝缘性、可靠性与安全性<sup>[5-6]</sup>,同时变压器运行6℃规则也揭示了对于变压器内的绝缘材料,高温会使其使用寿命减少一半<sup>[7]</sup>。电抗器是特高压直流场中发热量最大、最为重要的设备,对其进行降温一直是该领域的研究热点,根据电抗器绝

缘等级要求,特高压直流场中等级应不低于F级<sup>[8]</sup>。除此之外,电力设备本身的运行环境需求较高,国际IEC标准、国家GB标准和电力行业DL标准等对电力设备运行环境都有很严格的规定<sup>[9]</sup>。相关研究也强调了采取冷却降温措施的必要性,传统单一降温方式中,刘朝根<sup>[10]</sup>指出,可在变电站中安装通风系统和空调系统,以便驱散产生的热量来调节室内温度和湿度;贾思雅等<sup>[11]</sup>通过对换电站空间温度场模拟,指出垂直向下的送风方式变为倾斜角度的送风方式空间温度场均匀性更好。为优化节能效果,陈文霞<sup>[12]</sup>提出了在变配电间利用自然通风与空调交替的方式来达节能目的;Suenage<sup>[13]</sup>针对电力设备高热量聚集区域,研究出MACS多单元空调系统进行输送冷量,起到了显著降温和节能的优势。这些研究均是基于通风方式对户内直流场进行冷却降温,在工程应用中可起到一定的效果,但对于特高压直流场这样的大型功能性建筑,仅采用通风方式一方面会造成很大的能耗<sup>[14]</sup>,另一方面也易引起室内尘埃飞扬,从而造成直流闪污等安全隐患<sup>[15]</sup>。

当前,中国特高压直流场环境调控技术缺乏针对性的研究和可参考的完整设计规范,相关的借鉴案例也较少,文中根据特高压直流场内电抗器热源特性以及直流场内热环境调控要求,提出辐射降温

方案并进行了相应研究,解决了通风降温方式在直流场内运行弊端问题,也具有降低能耗优势<sup>[16-17]</sup>。利用Fluent软件模拟预试验,优选辐射板放置距离以及辐射板表面温度,研究辐射板放置位置对电抗器的降温冷却效果,为解决电抗器高效冷却问题、优化特高压直流场内环境调控提供参考。

## 1 工程概况

特高压直流场内输配电电压等级较高,属于大空间建筑,安全距离保持在10 m以上,高度也需在30 m以上。电抗器是直流场内的核心设备,整体形状为圆柱体,由导线绕成螺线管形式,也是室内热流密度最大的内热源,其热负荷占据整个室内热负荷可高达80%<sup>[18]</sup>,但其表面温度受到严格控制,按绝缘等级要求划分为A、B、F、H、N、R、S,最高等级为A级,上限温度为105℃;最低等级为S级,上限温度为240℃。以广州某±800 kV特高压直流场为例,其室内布置见图1,建筑尺寸为长为146 m,宽为48.5 m,最大高度为24 m,最小高度为21 m。项目包含两间启动回路直流场,每个房间内设12台电抗器,外半径为2.25 m,内半径为2.0 m,高为3.7 m,并由绝缘底座将其支撑于6.3 m高空,每台电抗器的产热量为139.3 kW。将其作为研究对象,提出采用辐射方式对特高压直流场内电抗器进行冷却降温研究。

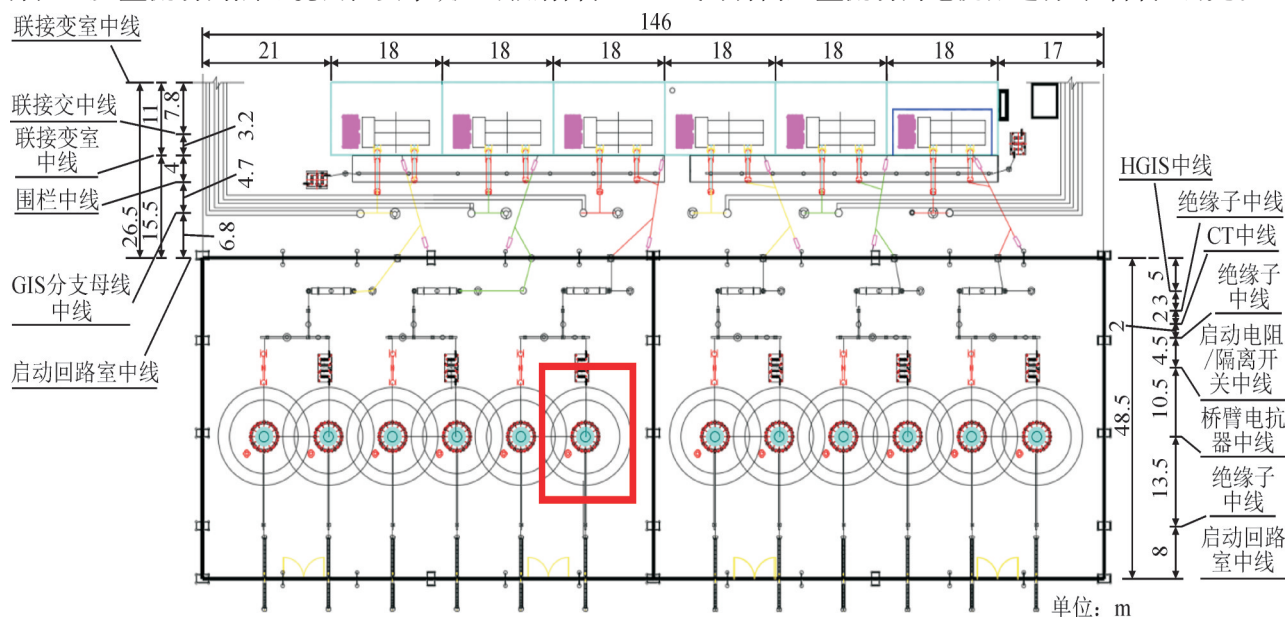


图1 广州某±800 kV特高压直流场室内布置图

Fig. 1 Interior layout of an ±800 kV UHV DC field in Guangzhou

## 2 预试验模型建立

### 2.1 数学模型

1)冷媒与辐射板内壁换热计算。冷媒与管内壁

之间的对流换热可按强制对流换热进行计算,假设管内冷媒流动为湍流换热<sup>[19]</sup>,其冷媒与管内壁面之间的对流换热计算为:

$$q_w = S_p h_w (T_p - T_w) \quad (1)$$

$$S_p = \pi d_{in} L \quad (2)$$

$$h_w = \frac{(f_s/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_s/2)^{1/3}(Pr^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_{in}}{L} \right)^{2/3} \right] \frac{\lambda_w}{d_{in}} \quad (3)$$

$$f_s = \frac{1}{(1.58 \ln Re - 3.28)^2} \quad (4)$$

式(1)-(4)中： $q_w$ 为冷媒与辐射板内壁换热量， $W/m^2$ ； $S_p$ 为管内壁面积， $m^2$ ； $d_{in}$ 为内径， $m$ ； $L$ 为管长， $m$ ； $h_w$ 为冷水与管内壁之间的换热系数， $W/(m \cdot K)$ ； $T_p$ 为管壁内表面温度， $^{\circ}C$ ； $T_w$ 为管外壁温度， $^{\circ}C$ ； $\lambda_w$ 为冷媒导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； $Pr$ 为普朗克数； $Re$ 为雷诺数。

2)辐射板表面与室内换热计算。辐射板表面与电抗器之间存在辐射换热，还有与周围空气的对流换热，同时周围物体与电抗器之间也存在辐射换热，彼此之间的传热过程比较复杂。现行辐射板供冷计算方法很多都忽略了室内热源环境及辐射板自身参数对对流换热的影响，使得计算结果有一定偏差，江亿院士提出一种基于室内等效辐射温度  $t_{rad}$  的辐射板供冷量计算方法<sup>[20-22]</sup>，从而使计算有效地反映热源对辐射板换热的影响，计算方法为：

$$(t_{rad} + 273)^4 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \varepsilon_i F_{p-i} (t_i + 273)^4}{A_p \varepsilon_p} \quad (5)$$

$$F_{p-i} = \int_{A_i} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_i \quad (6)$$

式(5)、(6)中： $t_{rad}$ 为等效辐射温度， $^{\circ}C$ ； $A_i$ 为*i*表面的面积， $m^2$ ； $\varepsilon_i$ 为*i*表面的辐射发射率； $F_{p-i}$ 为*i*表面与热源之间的角系数； $t_i$ 为*i*表面的温度， $^{\circ}C$ ； $A_p$ 为辐射板面积， $m^2$ ； $\varepsilon_p$ 为辐射板表面发射率； $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为黑体微元面  $dA_i$  和  $dA_p$  的法线和连线*r*间的夹角。

3)冷辐射板与室内换热量为：

$$q_t = q_c + q_r + q_s \quad (7)$$

$$q_c = h_c (t_a - t_p) \quad (8)$$

$$q_r = \bar{h}_c (t_{rad} - t_p) \quad (9)$$

式(7)-(9)中： $q_t$ 、 $q_c$ 、 $q_r$ 、 $q_s$ 分别为辐射板与室内总换热量、对流换热量、辐射换热量、短波太阳辐射得热量， $W/m^2$ ； $h_c$ 为辐射板表面传热系数， $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ； $t_a$ 为空气温度， $^{\circ}C$ ； $t_p$ 为辐射板表面温度， $^{\circ}C$ ； $\bar{h}_c$ 为等效辐射换热系数， $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ，取值  $5.5 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ <sup>[23-26]</sup>。

## 2.2 几何模型和网格划分

本项目直流场内主体厂房包含中央阀厅和两侧的2个启动回路直流场，启动回路外侧均敞开，每个启动回路区域尺寸为  $146 m \times 48.5 m \times 24 m$ ，几何建筑模型见图2、3。

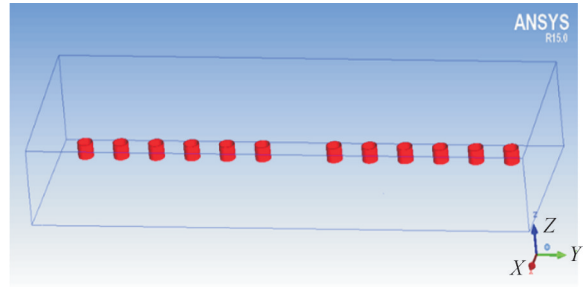


图2 电抗器模型示意图

Fig. 2 Model diagram of smoothing reactor

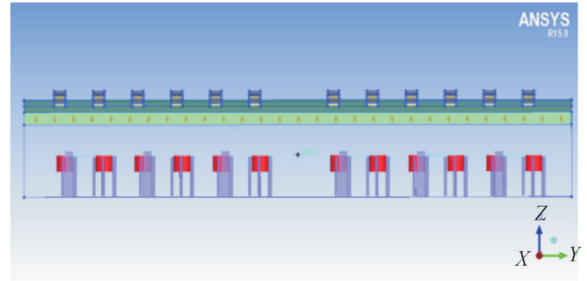


图3 建筑模型正面图

Fig. 3 Front view of the architectural model

根据计算原理，空气介质为不可压缩稳态流，流动状态为湍流的自然对流，文中选用 Realizable  $K-\varepsilon$ 模型，辐射模型采用 DO 辐射模型，网格划分与计算域的离散化选用有限体积法，计算空间离散选用 Octree 算法生成非结构四面体网格计算空间，全局最大尺寸(global element seed size)设置为 0.5，送风口、排风口及主要散热设备电抗器、母线、灯具等作局部加密，其最大尺寸(maximum size)缩至 0.05，网格划分后的网格质量在 0.3 以上。

## 2.3 边界条件和计算设置

1)边界条件。根据本项目建筑特性，两侧敞开风口为压力进风口，顶部气楼为压力出风口。以广州夏季工况为例，夏季室外温度为  $34.2^{\circ}C$ ，风压设为  $0 Pa$ ，仅考虑热压的极端工况，相对压力设置为  $0 Pa$ 。在特高压直流场大空间内，主要发热对象为平波电抗器、母线以及灯具，各工况下的边界条件设置见表1。

表1 不同工况下物体边界条件

Table 1 Object boundary conditions under different working conditions

工况	散热对象	负载率/%	发热量/kW	表面热流密度/( $W \cdot m^{-2}$ )
极端工况	电抗器	100	137.0	1 240
	灯具	100	20.3	248
	母线	100	28.4	445
日常运行工况	电抗器	75	103.0	930
	灯具	75	15.2	186
	母线	75	21.3	334

外围护结构与外界为对流换热,维护结构内表面与室内存在辐射换热,地面设置为恒温地面,相邻房间阀厅采用全室空调,各维护结构边界条件设置见表2。

表2 围护结构边界条件

Table 2 Enclosure boundary conditions

围护结构类型	传热系数 $[W/(m^2 \cdot K)^{-1}]$	温度/°C
屋面	0.304	43.8
阀厅挡墙	0.444	30.0
其他墙面	0.444	34.2
地面	1.280	28.0

2)结构设计。在特高压直流场中,设置冷辐射板对电抗器降温冷却,在其他条件已定的情况下,平波电抗器所获冷辐射量 $q_r$ 和对流换热量 $q_c$ 主要与角系数 $F_{p-i}$ 、辐射板表面发射率 $\varepsilon_p$ 、辐射板表面传热系数 $h_c$ 和辐射板温度 $t_p$ 有关。基于此,为尽可能增大角系数,设计电抗器的冷辐射板为全包围曲面辐射板,见图4、5。针对于特高压直流场,平波电感器表面温度可高达上百°C,辐射板材料需考虑耐热耐压性能,此处拟选用聚丁烯(PB)。

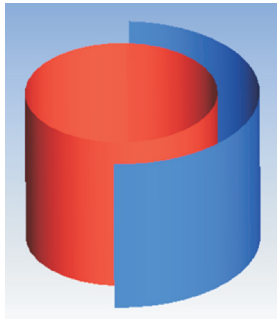


图4 曲面辐射板示意图

Fig. 4 Schematic map of curved radiant panel

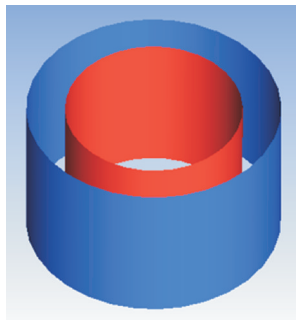


图5 全包围曲面辐射板示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a fully enveloping surface radiant plate

### 3 辐射板冷却效果分析

以冷辐射方式对电抗器进行降温冷却,主要探究冷辐射板放置位置对降温冷却效果的影响,预试

验模拟用于优选辐射板放置距离以及冷辐射板表面温度,在此基础上重点研究辐射板放置位置的影响。验证计算模型,项目实测高度截取电抗器高度9 m,最热点温升相对误差为7.9%,平均温升相对误差为8.5%,在可接受范围内。根据实测点取截面 $z=9$  m和截面 $y=63$  m为观测面,分别观察辐射板冷却效果和周围温度场效果,截取示意图见图6、7。

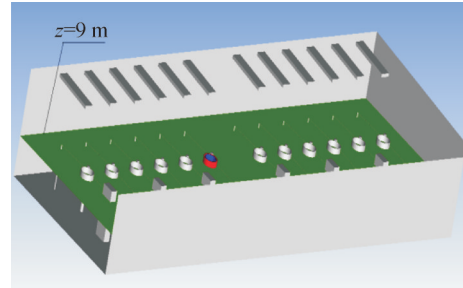


图6 截面 $z=9$  m位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of section  $z=9$  m position

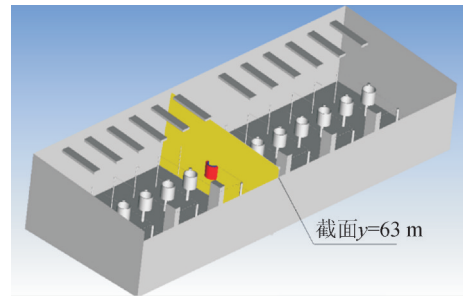


图7 截面 $y=63$  m位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the position of the section  $y=63$  m

根据数学模型可知,辐射换热量与冷辐射板放置距离以及冷辐射板表面温度均成反比关系。由角系数计算,辐射板放置距离宜设置1 m以内;辐射板表面温度宜高于广州地区空气露点温度,低于空气干球温度,以电抗器内表面最高温度和平均温度作为优选依据。

#### 3.1 辐射板预试验分析

1)辐射板放置距离预试验。辐射板表面温度取20 °C,以不采取降温措施时电抗器运行最高温度为对照组温度,将辐射板距离按等级划分为100、300、500、700、900 mm进行预试验模拟见图8。

由图8可知,随着辐射板放置距离的增大,降温冷却效果逐渐变差,当距离大于500 mm时,辐射板距离变化对电抗器表面的降温效果的影响逐渐降低,因此辐射板放置距离应尽可能小于500 mm,兼顾考虑人员拆装维修便利,辐射板放置距离此处取300 mm。

2)辐射板表面温度预试验。取辐射板放置距离为300 mm,以广州夏季气象参数为依据,最高过冷

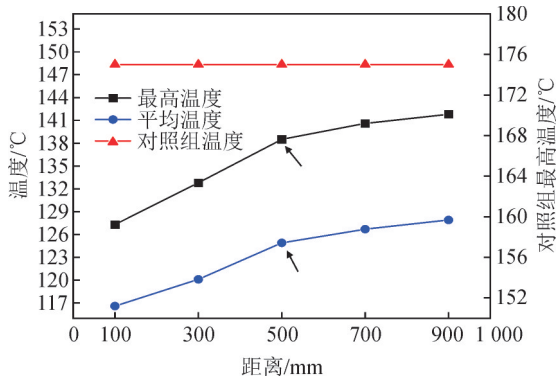


图8 不同辐射板距离下的电抗器内表面温度

Fig. 8 The inner surface temperature of the reactor at different radiant plate distances

度对应的温度下限应为 16.9 °C,取整 15 °C 作为辐射冷却板温度理论下限;最高辐射温度不宜高于夏季室外空气温度 34.2 °C,取 30 °C 作为辐射板温度理论上限。取辐射板温度 10、15、20、25、30 °C 进行预试验见图 9。

由图 9 可知,随着辐射板温度的升高,降温冷却效果逐渐减弱,但辐射板表面温度的改变对于电抗器

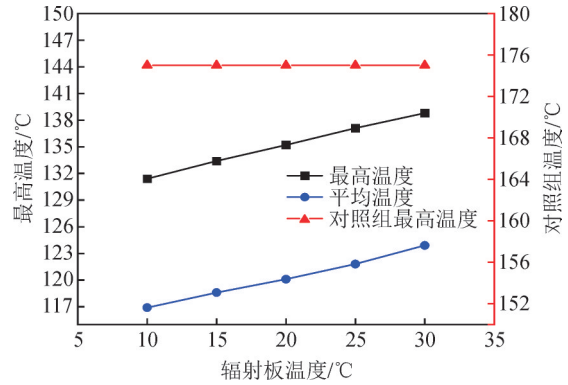


图9 不同辐射板温下的电抗器内表面温度

Fig. 9 The inner surface temperature of the reactor at different radiant plate temperatures

表面降温效果没有太大趋势变化。为达到较好的冷却效果,在下限值的基础上,辐射板表面温度应尽可能降低,兼顾节能需求,辐射板表面温度宜取 20 °C。

### 3.2 不同放置方法效果分析

辐射板表面温度取 20 °C,辐射距离 300 mm,分别模拟冷辐射板内置、外置和内外兼置 3 种放置位置的降温冷却效果,模拟结果见图 10、11。

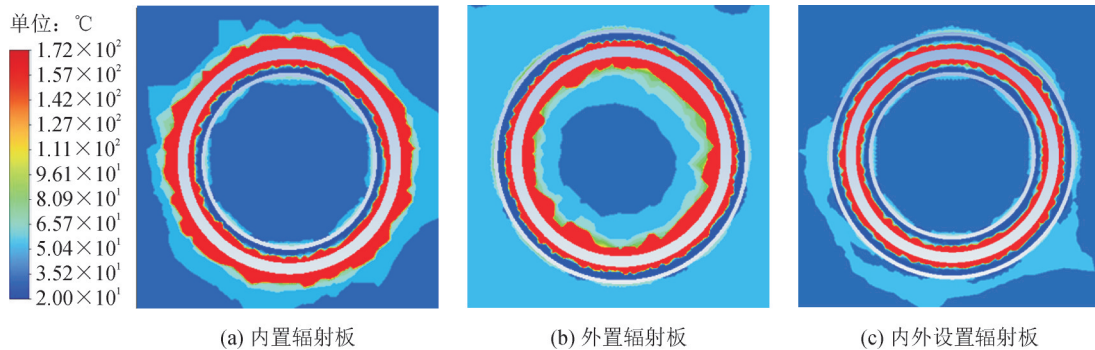


图 10 截面 z=9 m 电抗器附近温度分布情况

Fig. 10 Temperature distribution near the cross-section z=9 m reactor

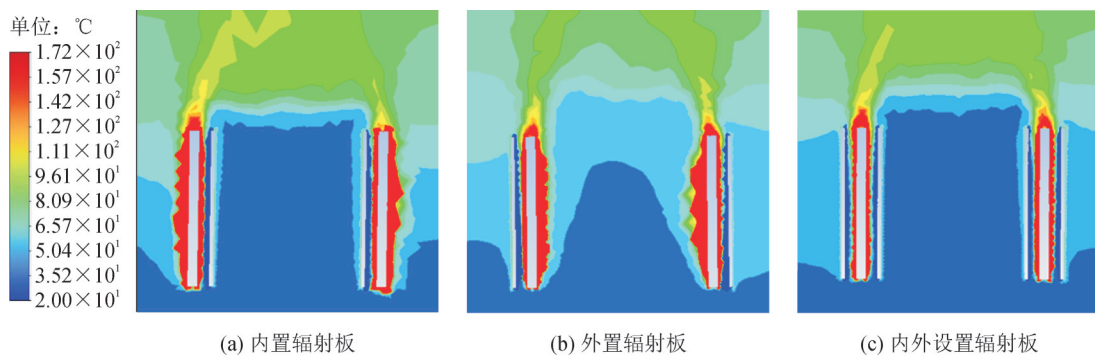


图 11 截面 y=63 m 上电抗器附近温度分布情况

Fig. 11 Temperature distribution near the reactor on section y=63 m

电抗器运行过程中,内表面温度要高于外表面温度,在整个建筑空间上部聚集较大的高温热流。由图 10、11 可知:内置辐射板时,电抗器内表面高温层明显减弱,并且温度梯度过大现象得到一定缓

解,但是外表面高温层改善不明显;外置辐射板时,虽然电抗器外表面高温层明显减弱,但附近热流紊乱,整体温度梯度改善效果不如内置辐射板;内外兼置辐射板时,电抗器内外表面高温得到明显的改

善, 整个空间热流分布也较均匀, 具有较理想的降温冷却效果。

将Fluent模拟中的温度数据整理汇总至表3, 进行数据分析。

表3 辐射板放置不同位置下的电抗器表面温度

Table 3 Reactor surface temperature at different positions where radiant plates are placed

°C

放置方式	内表面			外表面		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
对照组	76.205	174.997	160.110	72.893	169.475	152.127
内置	61.362	135.326	120.352	71.834	131.098	122.786
外置	62.827	175.450	158.706	64.248	124.538	114.425
内外兼置	64.348	136.752	121.246	59.211	126.116	115.852

由表3可知, 当外置冷辐射板时, 电抗器内表面温度高达175 °C, 远高于电抗器绝缘F等级, 内表面平均温度为158 °C, 也不符合特高压换流场内电抗器要求; 而当冷辐射板内置时, 各表面最高温度均低于155 °C, 符合特高压电抗器绝缘等级要求; 相比于内置辐射板, 内外兼置的辐射板形式仅使电抗器外表面温度最大值降低5 °C。由此可见, 特高压直流场中, 采用辐射方式对电抗器进行降温冷却, 仅采用内置辐射板方式可达到电抗器等级要求, 综合成本和维修运行来说, 内外兼置辐射板方式的综合效益不大。

#### 4 结论

文中根据特高压直流场内电抗器特性以及运行环境需求, 提出采用冷辐射的方式进行降温冷却, 以广州某±800 kV特高压直流场为例, 对其室内电抗器进行辐射板设计, 并利用Fluent模拟效果。冷辐射方式不仅可以达到冷却降温的效果, 而且符合“双碳”战略理念, 具有显著的节能减排优势, 对其方案进行了分析得出以下结论:

1) 采用辐射方式对电抗器进行降温冷却具有较为显著的效果, 能够满足特高压直流场内电抗器绝缘等级要求;

2) 辐射板放置距离宜小于500 mm, 其对于电抗器表面的降温效果更明显;

3) 相比于外置辐射板形式, 内置辐射板对电抗器的降温冷却效果更好, 内外兼置的辐射板形式综合效益不高。

#### 参考文献:

[1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2025-07-21]. [http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c_1126527652.htm).  
Speech by Xi Jinping at the general debate of the 75th session of the united nations general assembly[EB/OL]. [2025-07-21]. [http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c_1126527652.htm).

www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c\_1126527652.htm.  
[2] 李 晖, 刘 栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的中国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.  
[3] 谢 典, 高亚静, 刘天阳, 等. “双碳”目标下中国再电气化路径及综合影响研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(3): 1-8.  
XIE Dian, GAO Yajing, LIU Tianyang, et al. Study on the impact of re-electrification on the path to carbon peaking and carbon neutralization in China[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(3): 1-8.  
[4] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在中国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.  
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.  
[5] 郭春梅, 于会民, 马书杰, 等. 温度和湿度对变压器油微水含量和绝缘性能的影响[J]. 变压器, 2012, 49(12): 50-55.  
GUO Chunmei, YU Huimin, MA Shujie, et al. Effects of temperature and humidity on water content and insulating property of transformer oil[J]. Transformer, 2012, 49(12): 50-55.  
[6] 胡雪莹, 李 琳. 基于全寿命周期成本和综合故障率的油浸式变压器经济寿命评估[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 47-54.  
HU Xueying, LI Lin. Economic life evaluation of oil-immersed transformer based on life cycle cost and comprehensive failure rate [J]. Smart Power, 2024, 52(1): 47-54.  
[7] NORDMAN H, LAHTINEN M. Thermal overload tests on a 400 MVA power transformer with a special 2.5 p.u. short-time loading capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 107-112.  
[8] 乐 波, 张燕乘, 郑 劲, 等. ±800 kV 直流干式平波电抗器的技术规范[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 170-173.  
YUE Bo, ZHANG Yanbing, ZHENG Jin, et al. Study on the technical specification of ±800 kV UHVDC dry-type smoothing reactor[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 170-173.  
[9] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020 [S]. 2020.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Ad-

- ministration of the People's Republic of China. Common technical requirements for standards of high-voltage AC switchgear and controlgear: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
- [10] 刘朝根. 浅谈在高湿度重污染环境运行的中压电力设备如何避免受损老化[J]. 科技创新与应用, 2017(18): 167.  
LIU Chaogen. A brief discussion on how to prevent damage and aging of medium - voltage power equipment operating in high - humidity and heavily polluted environments[J]. Technology Innovation and Application, 2017(18): 167.
- [11] 贾思雅, 任洪娟. 换电站空间温度场仿真及优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(9): 1-3.  
JIA Siya, REN Hongjuan. Simulation and optimization of space temperature field for EV charging station[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(9): 1-3.
- [12] 陈文霞. 石化厂变配电间通风设计探讨[J]. 石油化工设计, 2013, 30(1): 5-7.  
CHEN Wenxia. Discussion on ventilation design of transformer and switch room in petrochemical plant[J]. Petrochemical Design, 2013, 30(1): 5-7.
- [13] SUENAGA T, MATSUURA F. A new air conditioning system for telecommunications equipment rooms with high - heat generation density[C]//INTELEC'84 - International Telecommunications Energy Conference, USA: New Orleans, 1984: 532-537.
- [14] 任彦辉, 宋景龙, 余 瑞, 等. 考虑需求侧响应的配电网无功补偿装置协调优化[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 79-86.  
REN Yanhui, SONG Jinglong, YU Rui, et al. Coordinated optimization of reactive power compensation device in distribution network considering on demand - side response[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 79-86.
- [15] 罗昊敏, 张 杰, 左 鑫, 等. 变压器室通风方式的节能研究及优化[J]. 节能, 2021, 40(3): 4-8.  
LUO Haomin, ZHANG Jie, ZUO Xin, et al. Energy-saving research and optimization of ventilation mode in transformer room[J]. Energy Conservation, 2021, 40(3): 4-8.
- [16] 何 婧, 杜 静, 寿青云, 等. 浅议辐射供冷空调系统在工程中的应用[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(1): 59-61.  
HE Jing, DU Jing, SHOU Qingyun, et al. Introduction on application of radiant cooling air condition system in engineering [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2008, 29(1): 59-61.
- [17] NIU J, KOOI J V D, RHEE H V D. Energy saving possibilities with cooled - ceiling systems[J]. Energy and Buildings, 1995, 23(2): 147-158.
- [18] 徐 波, 伍声宇, 侯东羊, 等. 考虑季节性储氢的区域能源系统优化模型[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 40-47.  
XU Bo, WU Shengyu, HOU Dongyang, et al. Regional energy system optimization model considering seasonal hydrogen storage [J]. Smart Power, 2024, 52(2): 40-47.
- [19] 翟苏巍, 李文云, 周 成, 等. 基于改进概率神经网络的储能电池荷电状态估计[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 94-100.  
ZHAI Suwei, LI Wenyun, ZHOU Cheng, et al. State - of - charge estimation of energy storage batteries based on modified probabilistic neural networks[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 94-100.
- [20] 高志宏, 刘晓华, 张 伦, 等. 辐射板供冷性能影响因素与计算方法[J]. 暖通空调, 2011, 41(1): 33-37.  
GAO Zhihong, LIU Xiaohua, ZHANG Lun, et al. Influence factors and calculation method of radiant panel cooling capacity[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011, 41(1): 33-37.
- [21] 李要红, 王鹏翔, 彭 斌, 等. 考虑供需匹配特性的冷热电联供系统运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 52-62.  
LI Yaohong, WANG Pengxiang, PENG Bin, et al. Operational strategy of a combined cooling, heating and power system considering the matching characteristics of supply and demand[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 52-62.
- [22] 张 磊, 王满康, 叶 婧, 等. 兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 105-117.  
ZHANG Lei, WANG Mankang, YE Jing, et al. An equivalent simplified model for a complex heating network with a balance between solution speed and privacy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 105-117.
- [23] 陈 萍, 党 喜, 刘龙成, 等. 考虑风光不确定性的暂态稳定约束最优潮流模型研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 17-24.  
CHEN Ping, DANG Xi, LIU Longcheng, et al. Transient stability constrained optimal power flow model considering uncertainty of wind and photovoltaic output[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 17-24.
- [24] 沈 赋, 张宇涛, 王 健, 等. 基于改进随机响应面法的电—气—热区域综合能源系统概率能量流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 69-81.  
SHEN Fu, ZHANG Yutao, WANG Jian, et al. Probabilistic energy flow calculation for regional integrated electricity-gas-heat energy systems based on an improved stochastic response surface method [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 69-81.
- [25] 蒋 冲, 范必双, 徐向前, 等. 计及传热效应的配电网弧光接地故障模型及混合消弧方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 1-12.  
JIANG Chong, FAN Bishuang, XU Xiangqian, et al. Research on arc grounding fault model considering heat transfer effects and hybrid arc suppression method for distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 1-12.
- [26] 张 妹, 江洪辉, 臧天磊, 等. 考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 13-24.  
ZHANG Shu, JIANG Honghui, ZANG Tianlei, et al. Low - carbon economic dispatch of multi - park integrated energy systems considering augmented carbon emission flow of thermal storage[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 13-24.
- 林真国(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为建筑节能、能源应用(E-mail: 625538893@qq.com)。  
黄 媛(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为能源应用(通信作者)(E-mail: 2609596454@qq.com)。