

# 智能变电站智能控制柜散热策略研究

田宇<sup>1</sup>, 赵恒阳<sup>2</sup>, 柯艳国<sup>1</sup>, 李宾宾<sup>2</sup>, 金甲杰<sup>3</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司 安徽 合肥 230022; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 安徽 合肥 230022; 3. 国网安徽省电力有限公司芜湖供电公司 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 随着智能变电站的发展, 智能电子设备 (Intelligent Electronic Device, IED) 需要在户外一次设备处就地安装。智能控制柜除了需要满足安装于柜体内的电气设备实现原有的功能之外, 还需要提供电气设备一个安全适宜的运行环境, 具备良好的通风散热和保温能力是至关重要的。重点从目前控制柜的三种散热方案进行研究对比, 通过CFD软件建模仿真加以佐证, 依托权威机构实验验证中心开展高温实验并进行验证, 最后给出一套合理的智能控制柜散热选择方案。

**关键词:** 智能变电站; 智能控制柜; 散热方案; CFD软件建模; 高温实验验证

## Research on heat dissipation strategy of intelligent control cabinet in intelligent substation

TIAN Yu<sup>1</sup>, ZHAO Hengyang<sup>2</sup>, KE Yanguo<sup>1</sup>, LI Binbin<sup>2</sup>, JIN Jiajie<sup>3</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China; 3. Wuhu Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Company, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** With the development of intelligent substations, intelligent electronics devices need to be installed on the spot of the primary equipment. The intelligent control cabinet needs to ensure the electrical equipment installed in the cabinet realize the original functions, and provide a safe and suitable operating environment. It is crucial to have good ventilation, heat dissipation and thermal insulation. The research and comparison of the three heat dissipation schemes of the intelligent control cabinet are carried out by CFD software modeling and simulation. The experiment verification center of the State Grid Electric Power Research Institute carries out the high temperature test to verify. Finally, a reasonable heat dissipation option of intelligent control cabinet is given.

**Key words:** intelligent substation; intelligent control cabinet; heat dissipation solution; CFD software model; high temperature test verification

## 0 引言

智能电网是当今世界电网发展的新趋势, 经过近几年的研究和实践, 第二代智能变电站已建成投运并趋近成熟。户外智能控制柜因智能变电站就地化保护得到大量使用, 由于户外阳光直射的原因会造成柜内温度升高, 可能超

出设备允许的温度范围。通常电子元器件受环境温度的影响较大, 环境温度每增加10℃, 元器件工作异常的可能性就会升高<sup>[1]</sup>。电力系统二次设备的核心装置由大量芯片组成, 户外柜就地保护的装置若长时间工作在高温下, 会引起元器件性能的降低, 对电网系统的稳定性

造成重大影响<sup>[2]</sup>。仅安徽地区智能变电站就发生多起智能控制柜故障情况，在夏季连续高温天气，户外柜出现柜内温度过高、系统误告警、未工作于正常工作模式、显示屏花屏或风机停转等现象。户外控制柜的此类故障增加了人员运维检修的工作量，易造成较大经济损失及电网安全事故。

目前国内已建设投运智能变电站户外柜，在温度控制方面，主要采用风机、热交换器或空调器散热方式，其中风机属于直接风冷，而热交换器和空调器则属于间接风冷<sup>[3]</sup>。上述三种散热方式各自优缺点明显，成本、可靠性及散热效率各不相同，安徽省内就曾出现过因选型不当，导致散热设备效果不佳，甚至加速了柜内温度的上升，因此目前迫切需要依据户外柜使用地域和环境的差异，制定合适的散热解决方案，形成一套合理的选型标准<sup>[4]</sup>，既保证了散热设备功能的有效性，又提高了供电可靠性，确保电网安全。本文旨在研究户外柜不同散热方式的可靠性及对应的环境适应性和应用原则，指导不同地域环境条件下的散热设计，通过计算流体动力学（CFD）软件建模仿真结果加以佐证，依托权威机构实验验证中心开展高温实验并进行验证，从而形成一套散热选型方案。

## 1 智能变电站户外柜散热方案设计

### 1.1 风机散热

目前安徽省内智能变电站16.91%的智能控制柜采用风机散热方式。风机需要配合温湿度控制器、传感器和加热器完成柜体内外环境的热交换过程，确保柜内设备在标准要求的温湿度环境下运行。

目前主流的户外柜风机散热设计主要是在柜内顶部配置两只及以上的风机，柜内侧板配置进气过滤窗，顶部四侧开设通风孔，温湿度控制器作为风机散热的智能终端，根据柜内温度自动启动、关闭风机，保证风机的合理运行。当风机抽风工作时，外部空气从底部流经柜内设备，通过顶部的通风孔排出，形成穿越

柜内的风道<sup>[5]</sup>。

### 1.2 热交换器散热

目前安徽省内智能变电站66.79%的智能控制柜采用热交换器散热方式，数量最多。热交换器是将热管元件按一定行列间距采用等边平行布置方式，成束装在框架的壳体内，用中间隔板将热管的加热段和散热段分开，构成热管<sup>[6-7]</sup>。工作时内外两个风机驱动柜外的冷空气和柜内的热空气，形成内外循环，热交换器提供了内环循环热量交换的场所。

### 1.3 空调散热

目前安徽省内智能变电站16.29%的智能控制柜采用空调器散热方式。空调器的制冷功能是通过压缩机、蒸发器、冷凝器、冷却风机、干燥过滤器和内风机等组件实现的<sup>[8]</sup>。机柜内空气是通过内风机实现循环的，机柜内热空气从空调器的上部进入，通过蒸发器降温，冷空气再从空调器的下部吹出。通过传感器采集内部进风温度，从而智能控制空调的开关，并有效地控制柜内温度。

## 2 智能控制柜散热方案仿真分析

基于计算流体动力学和传热学基本原理，采用电子设备专用热分析软件FLOTHERM对户外柜三种散热模式下柜内流场及温度场进行仿真模拟，通过合理设计风道最大限度地利用内部流场的热交换作用，获得了柜内主要装置安装位置的最佳温升。仿真模拟是在环境温度45℃环境下进行的，设置环境散热系数为10 W/(m<sup>2</sup>·K)，模拟时没有考虑太阳辐射的影响，分析时每台机柜内部分别配置3台发热功率为150 W的装置，总发热量为450 W。

### 2.1 风机型户外柜仿真分析

风机型户外柜采用轴流风机进行内外空气交换，进风口风机风量为161.5 m<sup>3</sup>/h，出风口风机风量为324 m<sup>3</sup>/h。仿真结果如图1所示。

从图1可知，冷空气从机柜后门下方进入机柜内部，在进风风机的作用下，流动到柜内

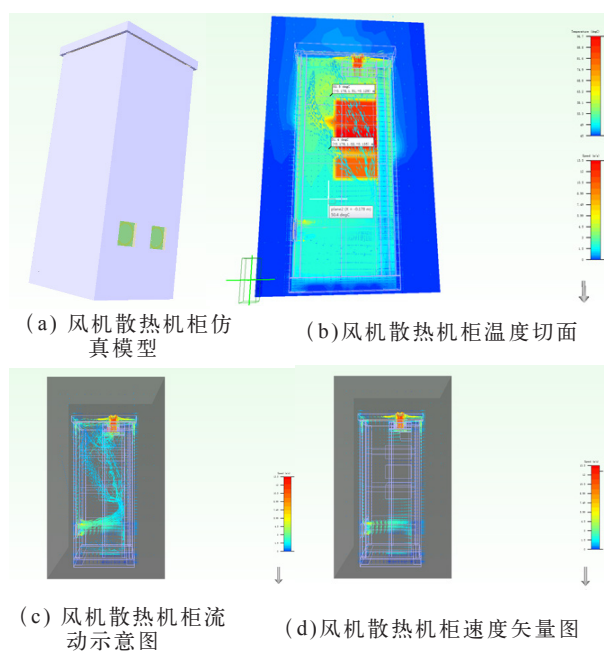


图1 仿真结果1

Fig. 1 Simulation results 1

的装置表面,最后经位于机柜顶部风机排出,流场分布均匀,无涡流产生,柜内平均温度为49.3 °C。

## 2.2 热交换器型户外柜仿真分析

散热设备采用工业级壁挂式热交换器,散热系数为 $80\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 。仿真结果如图2所示。

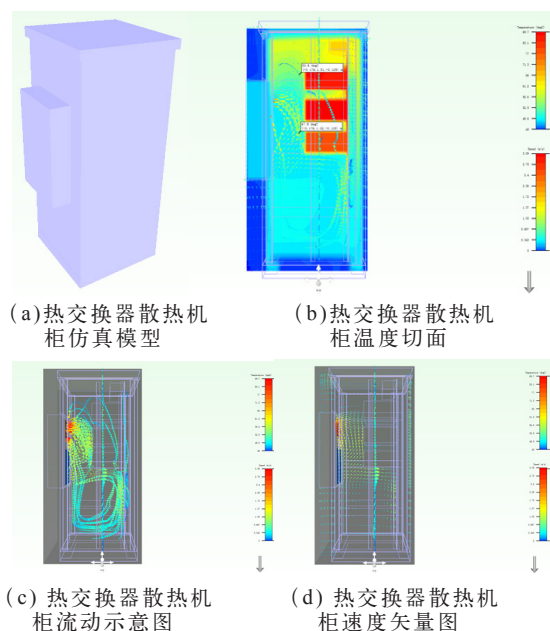


图2 仿真结果2

Fig. 2 Simulation results 2

通过上述仿真可知,热交换器在机柜内部形成了一个完整的流动循环。位于热交换器上方的进风风机将机柜上部的热空气吸入,经过交换器内部热管与外界空气传热,再从热交换器下方的冷空气出口排入机柜。冷空气流经机柜内部装置表面,带走装置表面的热量,空气温度升高,在重力作用下到达机柜上方,并进入热交换器内循环,流场均匀,但柜内平均温度较高,局部温度高达53.8 °C。

## 2.3 空调器型户外柜仿真分析

散热设备采用工业级壁挂式空调器,空调器最大制冷量为1 500 W。仿真结果如图3所示。

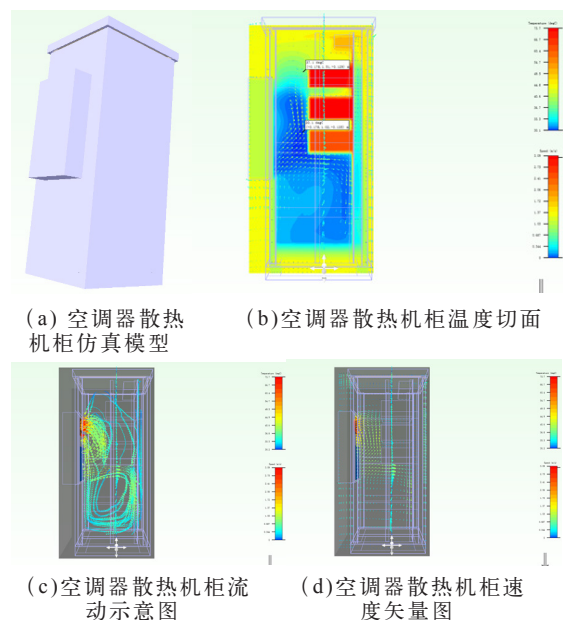


图3 仿真结果3

Fig. 3 Simulation results 3

通过上述仿真可知,空调器在机柜内部形成了一个完整的流动循环,空调器自带的风机将机柜上方的热空气吸入空调器内部,进入散热过程,位于空调器下方的冷空气出口风机将冷风排出空调器进入机柜内部,冷空气流经机柜内装置表面,带走装置的热量,空气温度升高并在重力作用下到达机柜上方,进入空调器内循环,内流场分布均匀,无涡流产生,柜内平均温度为34.5 °C。

为了柜内设备布局合理及检修方便,智能终端、合并单元等散热量较大的设备在现场安装

时,通常位于距地面1~1.5 m的高度。因此在仿真过程中,重点对上述两个位置的温度进行监测,通过多次采样得出平均温度。三种散热方式机柜仿真模拟过程中监测点的平均温度如下表所示。

表 仿真模拟结果汇总

Tab. Summary of simulation results

| 散热方式 | 测点温度/℃ (环境温度设定为45℃) |          |
|------|---------------------|----------|
|      | 距底部1.0 m            | 距底部1.5 m |
| 风机   | 47.8                | 51.8     |
| 热交换器 | 51.4                | 53.8     |
| 空调器  | 30.1                | 37.1     |

上述仿真结果表明,空调器散热效果较明显,风机的散热效果优于热交换器。在重力的作用下,冷却后的空气聚集在底部,随着高度的上升,温度明显上升,表中距底部1.5 m处的温度明显高于距底部1 m处的温度,因此在工程设计时可考虑将发热量较大的装置安装在柜内较低的位置。

### 3 户外柜高温实验

国家电网有限公司于2012年颁布的标准Q/GDW 734《智能高压设备组件柜技术条件》对户外柜的环境耐受实验规定如下:环境温度+45℃、太阳辐射强度为1 120 W/m<sup>2</sup>及柜内有200 W模拟发热载荷时,柜内温度不高于55℃。

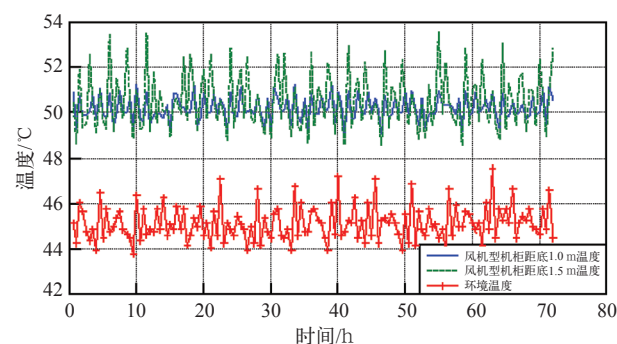
根据上述要求,实验设定户外控制柜环境温度为45℃,考虑极端高温情况下,可将环境温度设定为55℃,并持续监测柜内温度变化情况。正常运行的户外柜内部总发热功率约为300 W,将太阳辐射的发热功率估算为150 W,共计450 W。针对上述分析可将实验条件分别设定为以下三种模式:

- 1) 环境温度45℃,柜内热载荷300 W工况,持续72 h实验。
- 2) 环境温度45℃,柜内热载荷450 W工况,持续72 h实验。
- 3) 环境温度55℃,柜内热载荷300 W工况,持续48 h实验;温度降至30℃,继续实验24 h(环境突然变化情况下,检测系统运行情况)。

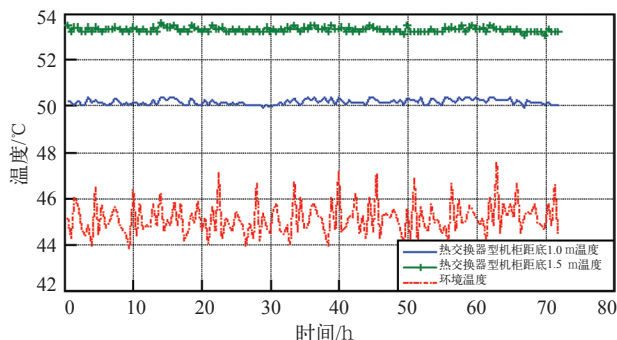
在第一种实验条件下,3个户外柜的测试

结果如图4所示。图中,红色曲线为柜外环境温度,为45℃左右;蓝色和绿色曲线分别对应柜内1 m处和1.5 m处温度,每30 min对上述两点温度采样一次。从图4中可以看出,风机型柜内温度范围为49~52℃,ΔT为5~7℃;热交换器型柜内温度范围50~53℃,ΔT为6~8℃;空调器型柜内温度范围为27~39℃。

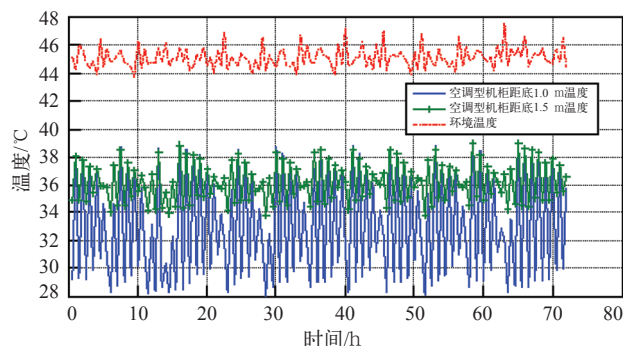
在第二种实验条件下,3个户外柜的测试结果如图5所示。由于柜内发热功率增加至450 W,风机型柜内温度范围为50~53℃,ΔT为5~8℃;



(a) 风机型户外柜柜内温度曲线



(b) 热交换器型户外柜柜内温度曲线

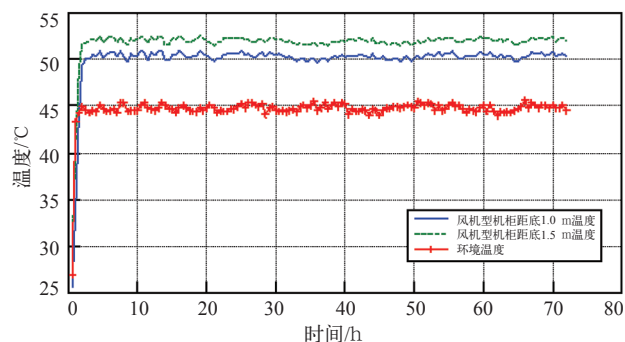


(c) 空调器型户外柜柜内温度曲线

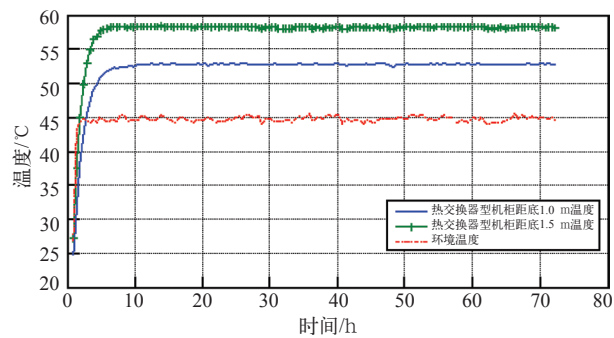
图4 在第一种实验条件下,3个户外柜的测试结果

Fig. 4 Under the first experimental condition, the test results of three outdoor cabinets

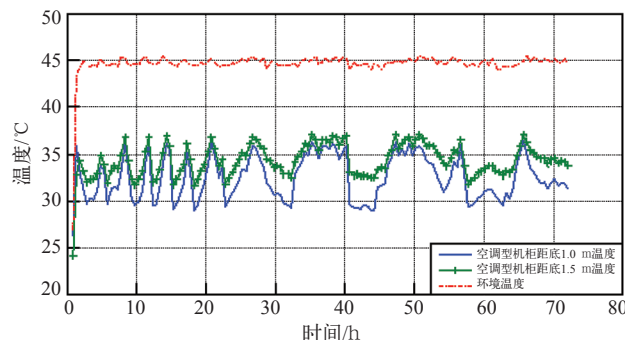
热交换器型柜内温度范围为53~58℃,局部温度超过标准规定的55℃,  $\Delta T$ 为8~13℃;空调器型柜内温度范围为29~37℃。



(a) 风机型户外柜柜内温度曲线



(b) 热交换器型户外柜柜内温度曲线



(c) 空调器型户外柜柜内温度曲线

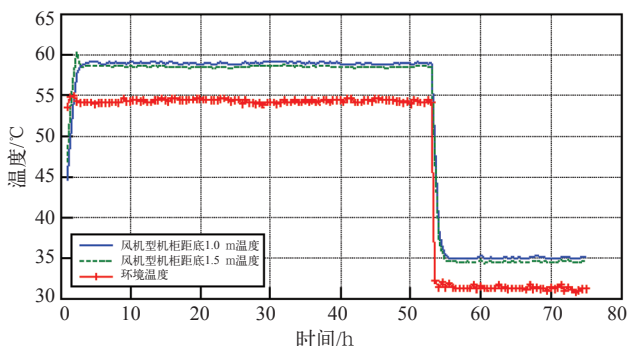
图5 在第二种实验条件下, 3个户外柜的测试结果

Fig. 5 Under the second experimental condition, the test results of three outdoor cabinets

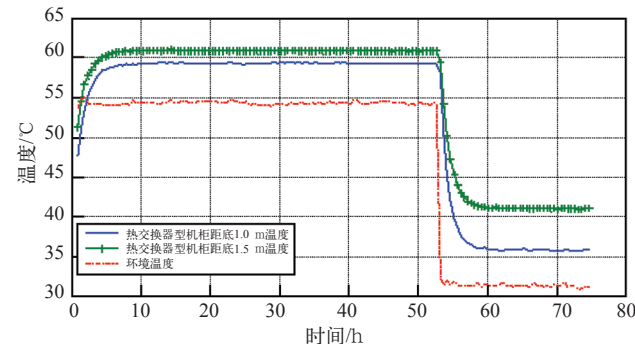
第三种实验条件下, 3个户外柜的测试结果如图6所示。当环境温度55℃时, 风机型柜内温度范围为58~60℃,  $\Delta T$ 为3~5℃; 热交换器型柜内温度范围为59~62℃,  $\Delta T$ 为4~7℃; 上述两种散热方式柜内温度均超过标准规定的55℃。空调器型柜内温度范围30~36℃。

环境温度急降至30℃时, 风机型柜内温度范围为35~36℃,  $\Delta T$ 为5~6℃; 热交换器

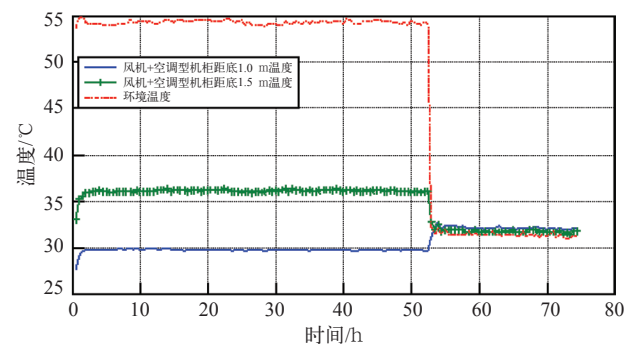
型柜内温度范围36~41℃,  $\Delta T$ 为6~11℃; 空调器型柜内温度32℃左右; 空调器和风机处于交换运行状态。上述结果表明, 温度突然变化后, 三种散热方式户外柜均能正常工作, 对温度变化的适应性较好。



(a) 风机型户外柜柜内温度曲线



(b) 热交换器型户外柜柜内温度曲线



(c) 空调器型户外柜柜内温度曲线

图6 在第三种实验条件下, 3个户外柜的测试结果

Fig. 5 Under the third experimental condition, the test results of three outdoor cabinets

由以上数据可以看出, 正如理论分析一样, 热交换器型柜内温度比风机型高出1~5℃, 说明热交换器这种间接散热方式效果弱于风机的直接对流散热方式; 空调器型柜内温度比较均衡, 维持在35℃上下。

风机散热方式的户外柜直接采用外部空气进行散热,外部空气通过过滤风机进入柜内,柜内温升稳定,长期运行后过滤网容易积灰,水汽容易进入柜内,太阳照射时柜顶温度较高,容易达到风机的极限工作环境温度,运行成本较低,适用于空气较干燥洁净、温度适中的环境。热交换器散热方式的户外柜通过内外独立的循环进行散热,柜内温升较恒定,由于没有内外相互循环,空气质量对设备影响不大,运行成本适中,适用于温度适中的环境。空调器散热方式的户外柜通过内外相互独立的循环进行散热,柜内温度通常低于外部环境温度,不受外部空气污浊等影响,长期运行费用较高。

#### 4 结束语

随着智能变电站的快速推进,智能控制柜的应用将不可或缺。考虑到户外环境的多样性、柜内温度的重要性,因此一套正确、合理的智能控制柜散热方案是必不可少的。本文对三种现有散热方案进行了详细的阐述,利用CFD软件进行建模仿真分析,并通过权威机构实验验证中心开展高温实验,验证三种方案的可行性和适用性,为在不同环境下选择合适的智能控制柜散热方案提供了依据。

风机散热的优点在于成本低,安装简便,能耗较少。缺点是由于与户外空气的直接交换,空气中的灰尘杂物较易吸入柜内,对装置造成污染,需保证过滤棉的长期有效。建议在户外温度环境清洁、空气污染指数不大的城市安装风机散热户外柜。

热交换器散热过程中,内部设备处于全封闭状态,柜内环境与外部环境相对独立,不会造成柜内环境的污染,且价格适中。缺点是柜内温度始终高于外部环境温度,在夏季高温时,散热效果不理想,一般热交换器的使用年限为5年,且后期维护成本较高。建议在户外温度小于35℃、空气质量不高的环境下采用此种散热方案。相较于热交换器散热,空调器散热由于内

部采用独立的制冷系统,柜内温度可以降到更低,可保持在35~40℃的最佳工作温度,不受外界温度的影响,防护等级高,但机柜空调器的结构较复杂,功率较大,维护成本高。建议在环境恶劣地区或重要变电站户外柜采用空调器散热模式。

#### 参考文献

- [1] 中国电器工业协会. 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法, 试验B: 高温: GB/T 2423.2—2008[S].
- [2] 朱云霄, 朱云灿, 严华. 智能变电站户外智能控制柜热设计[J]. 电子机械工程, 2009, 29(6): 18-22.
- [3] 张洋, 严华, 张永峰. 智能变电站户外控制柜风机散热研究及仿真分析[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2012(10): 49-51.
- [4] 雷铭, 王志林, 曹正锋. 智能变电站户外柜温湿度控制的研究[J]. 电力系统装备, 2013(3): 74-78.
- [5] 张仑山, 雍明超, 易永辉, 等. 基于新一代智能变电站整合型在线监测IED研究[J]. 电气应用, 2015, 34(1): 110-115.
- [6] 董国青, 金甲杰. 智能变电站户外智能柜散热方式研究[J]. 中国战略新兴产业, 2017(28): 133.
- [7] 潘良煜, 赵小虎, 李辉, 等. 基于主IED的智能变电站状态监测系统的应用及研究[J]. 电气应用, 2013, 32(12): 64-67.
- [8] 倪益民, 杨宇, 樊陈, 等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化, 2014(3): 194-199.

#### 作者简介



田宇

田宇 (1976—), 男, 高级工程师, 从事电网生产管理工作。

(收稿日期: 2018-02-05) **EA**