文章编号：1008－8857(2026)03－0148－08 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.03.003

变电站户外柜温湿度控制技术研究与应用进展

金公羽[1]，史宇超[1]，张家利[2]，过福兴[2]，任晨雨[3]，贾凤宇[3]，王 波[3]
（1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司，浙江 杭州 311000；2. 杭州中电天恒电力科技有限公司，浙江 杭州 310030；3. 上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：智能变电站是智能电网建设的重要支撑。作为智能变电站终端设备的户外智能控制柜肩负着与一次设备的信息交换任务。柜内智能电子装置对温度和湿度比较敏感，及时有效调节控制柜内温湿度是维护智能变电站安全稳定运行的关键。在分析智能变电站户外柜组成和工作条件的基础上，综述了典型的户外柜温度和湿度调节技术及其特点，介绍了户外柜温湿度控制综合应用典型案例，指出了智能变电站户外柜温湿度调节存在的不足与研究方向，以期为智能变电站户外柜温湿度控制技术的发展提供参考。

关键词：智能变电站；户外柜；温度；湿度；防凝露
中图分类号：TU831 **文献标志码**：A

Advances in temperature and humidity control technologies for outdoor substation cabinets

JIN Gongyu[1]，SHI Yuchao[1]，ZHANG Jiali[2]，GUO Fuxing[2]，REN Chenyu[3]，
JIA Fengyu[3]，WANG Bo[3]
(1. Hangzhou Power Supply Company State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311000, China; 2. Hangzhou Join Electric Technology Co. Ltd., Hangzhou 310030; 3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Smart substation is important in the construction of smart grids. As terminal equipment deployed in substations, smart outdoor cabinets serve as the interface for information exchange with primary equipment. The intelligent electronic devices inside these cabinets are sensitive to temperature and humidity variations. Therefore, timely and effective regulation of internal temperature and humidity is essential to ensure the safe and stable operation of smart substations. Based on an analysis of the configuration and working conditions of outdoor cabinets in smart substations, the typical temperature and humidity regulation technologies and their characteristics were summarized. Some successful application cases were also presented. The existing deficiencies and future research directions were discussed. This review aims to serve as a reference for the

收稿日期：2024－10－17
基金项目：浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ230009)
第一作者：金公羽(1991—)，硕士，工程师。研究方向：电气工程。E-mail：348088281@qq.com

development of humidity and temperature control of outdoor cabinets in smart substations.

Keywords: smart substation；outdoor cabinet；temperature；humidity；anti-condensation

我国以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础，利用先进的通信、信息和控制技术，构建了以信息化、自动化、数字化、互动化为特征的统一的坚强智能化电网[1]。智能变电站是建设坚强智能电网的重要支撑。与传统变电站相比，智能变电站中增设了大量就地安装的户外智能控制柜(简称户外柜)，与一次设备有机结合后形成智能设备，从而具备自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等功能[2]。以 220 kV 电压等级变电站为例，户外柜的数量可达 30 余个，其工作的可靠性对变电站运行安全有重大影响。据国网杭州供电公司统计，2022 年迎峰度夏期间公司所辖户外柜故障共计 84 起，且主要由柜内温湿度控制设备缺陷引起。户外柜温度或湿度异常已成为智能变电站运维检修工作的短板，迫切需要研究高效可靠的新型调节技术。

变电站户外柜温湿度控制是电气技术与空气调节技术的交叉领域，随着变电站的数字化和智能化发展，其重要性日益凸显。本文介绍该领域的研究与应用进展，分析并指出存在的问题，以期为智能变电站户外柜温湿度控制技术研究提供参考。

1　智能变电站户外柜组成与工作条件

1.1　户外柜的组成

智能控制柜是指高压设备智能组件及本体汇控用柜体，为智能电子、网络通信设备、电气及通信接口等提供运行环境。柜内一般按照合并单元、智能终端、继电保护装置、测控装置、状态监测智能电子设备(IED)及主 IED、过程层交换机、模拟接线面板、硬压板顺序自上而下依次布置[3]。

1.2　户外柜温湿度对智能设备性能的影响

高温是智能变电站户外柜内电子元器件面临的最严重的危害。电子元器件失效前的平均时间是其所承受电应力和热应力水平的统计函数。夏季炎热高温时，太阳辐射和柜内电子器件发热，会使没有控温措施的户外柜内温度高达 50～70 ℃。高温或高低温循环都会在器件材料内部引起过大的热应力，而过大应力会导致器件过早失效，寿命缩短。

湿度是影响户外柜工作的另一重要因素。在气候潮湿且柜内外温差较大时，柜壁和器件表面会发生凝露，引发电化学腐蚀及进而发生的导线断裂、带电部分绝缘下降和短路等问题，甚至会引发断路器误跳闸、误甩负荷[4-9]。

因此，户外柜的温湿度控制系统必须能在预期的热环境下，将柜内温度和湿度控制在规定水平。

1.3　户外柜温湿度控制要求

综合《智能变电站智能控制柜技术规范》(DL/T 1881-2018)[10]和《国家电网公司变电运维管理规定(试行)》[11](国网(运检/3)828-2017)的相关规定，户外柜温湿度控制系统应能在−40～45 ℃的环境温度下使柜内温度保持在 5～40 ℃，柜内温差不大于 10 ℃，柜内相对湿度小于 90%，以防止出现凝露。进行环境耐受试验时，除了环境温度外，还需考虑每面柜 200 W 的电子设备发热量和 1 120 W/m^2 的太阳辐射。

2　智能变电站户外柜环境控制技术

2.1　负荷分析

掌握智能变电站户外柜的夏季冷负荷和冬季热负荷，是温湿度调节系统设计的基础。

机柜的负荷主要包括通过机柜壁面传递的热量和柜内电子设备的发热量。通过机柜壁面传递的热量，受机柜尺寸、柜内温度、柜内风速、柜壁厚度及材料热物理性质(导热系数、吸收率和发射率等)、柜外环境温度及风速、太阳辐射等多种因素的影响。户外柜与室内机柜的重要区别在于，户外柜的壁面与周围大气的对流和辐射换

热，以及太阳对机柜的辐射，随昼夜更替和季节变换而不断变化。特别是隔热性能较差的单层金属壁面机柜，在夏季高温条件下，太阳对机柜的辐射热量通常显著大于柜内电子设备的发热量。因此，需要根据户外柜所在地的气象数据，确定空气调节室外计算参数，分别计算夏季逐时冷负荷和冬季逐时热负荷。

由于目前还没有关于机柜空气调节设计规范的国家标准，一般可参考《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2015）[12]和其他相关标准中的负荷计算方法，但需要注意机柜壁面和建筑墙面热物理性质的差异[13−15]。另外，还可以采用 FLUENT、ICEPAK 或 FLOTHERM 等软件进行数值模拟，分析户外柜的负荷特性以及柜内的速度和温度分布，为温湿度调节系统设计提供参考[14−16]。

2.2 温度调节技术

2.2.1 风扇强制通风散热

当户外柜采用自然对流和辐射方式散热时，在温差 10 ℃ 的条件下，可达到的热流密度一般小于 0.01 W/cm^2，所以在户外柜冷却中普遍采用强迫空气冷却方式。

风扇强制通风散热是指在户外柜内安装风扇，利用风扇的强制通风，使环境空气流入柜内，吸收柜内热量后排出，达到柜内降温的目的。考虑到控制柜下部有进线、加热电阻等，风扇一般布置在机柜前后门、两侧或顶部。因密度较低的热空气集中在机柜上部，可将风扇安装在控制柜下部向柜内吹风，也可以将风扇安装在控制柜上部向柜外抽风，如图 1 所示。一般优选吹

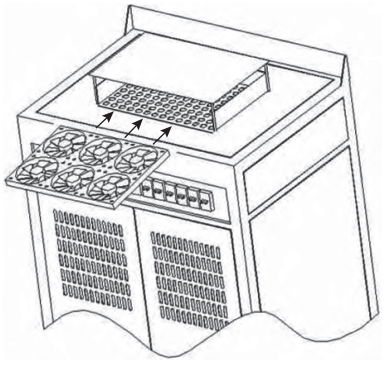

图 1 柜顶散热风扇

Fig. 1 Heat dissipation fans mounted on the cabinet top

风方式，其有利于防止风扇电机过热，提高风扇的使用寿命，但抽风方式可以使柜内流场和温度场更均匀[13]。

风扇强制通风散热系统设计的关键是确定合适的风扇位置、流道结构、通风量和通风阻力，使柜内空气流场分布与各元器件的热负荷分布相适应，从而控制柜内最高温度和最大温差，避免形成局部热点。通风量可以根据户外柜需带走的总热量和允许的柜内空气温差，利用热平衡方法进行估算。但是，由于柜内设备多，热源分布和流道结构复杂，温度场分布并不均匀，实际最大温差和按热平衡法估算的平均温差会有较大差异。在理论计算的基础上，一般需要通过数值模拟和环境耐受性试验进行设计优化，以获得最佳方案。肖星等[17]通过增高柜顶外侧散热风扇进气高度和加装柜内导流风扇等方式改进智能变电站交换机散热系统，有效解决了柜内热量集聚和柜内上下前后空气对流不畅问题，使得各时段机柜运行温度比改进前平均降低了 5 ℃，且均低于 55 ℃。郭胜军等[16]利用 SolidWorks Simulation 软件分析了通风孔和风扇布置位置等对户外机柜内流场和温度场分布的影响，认为单层结构、箱体不开孔和内部增加强制对流风扇的结构设计可以满足系统散热需求。朱云霄等[15]介绍了户外智能控制柜热设计时根据风扇和风道的流量−阻力特性曲线进行风扇选型的方法，同时开展了模拟试验。

风扇强制通风散热一般可以使户外柜内部温度稳定在高于环境温度 3～5 ℃ 的水平，而且成本低，能耗小，易于安装和维护。但机柜是非密闭的，也无除湿功能，因此柜内设备容易被从外部进入的气体和粉尘等物质污染腐蚀，不适用于湿热、尘雾环境。由于热量传递方向是从柜内高温空气到外部低温空气，柜内空气温度始终高于柜外空气，如果环境温度已高于允许的柜内最高温度，则柜内气温不能降到规定水平；在夏季气候潮湿时，也易发生凝露，进而引起电气设备故障[18]。因此该方法适用于空气干燥清洁、温度适中的环境。

2.2.2 空冷热交换器散热

为了克服风扇强制通风机柜防护等级低的缺点，可采用密闭式户外柜，并在密闭式户外柜上

安装如图 2 所示的换热器。该换热器换热元件多采用成束布置的热管，热管中间用隔板隔开，柜内风扇驱动柜内空气流过热管蒸发端，柜外风扇驱动环境空气流过热管冷凝端，将热量传递到柜外环境中，以降低柜内温度。

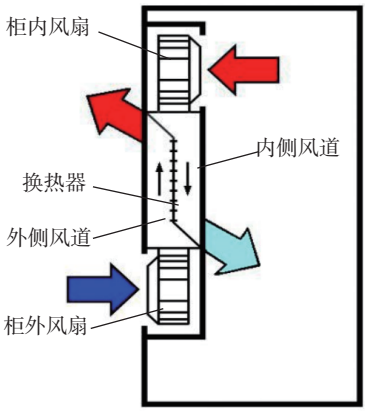

图 2　热交换器散热型户外控制柜示意图

Fig. 2　Schematic diagram of outdoor control cabinet with heat exchanger cooling

由于空气和换热元件壁面间的传热系数较小，机柜空间又很狭小，户外柜热交换器设计的关键是选择合适的换热器结构形式。采用热管和翅片管等强化传热，提高换热器紧凑性，才能在相同传热量下降低传热温差，在环境温度较高时确保柜内不会超温。吴雪峰等[19]针对数字化变电站智能终端柜内温度过高问题，提出加装隔热柜、空调和热交换器三种降温方案，发现翅片热板隔离式热交换器可使柜内温度约降低 15 ℃，耗电量适中，且通过层次分析法得出该方法为最佳方案。田宇等[20]采用 FLOTHERM 热分析软件研究了风扇、热交换器和空调三种散热方式对户外柜内流场和温度场的影响，并开展了高温实验。结果表明，在均采用环境空气作为冷却介质的条件下，热交换器型户外柜内部温度比直接通风散热型户外柜的高 1～5 ℃，降温效果弱一些。

空冷热交换器型户外柜的优点是柜内空间封闭，内外空气不流通，防护等级较高，也有利于避免潮气进入，保持柜内绝对湿度稳定，防止凝露。但是，和风扇强制通风冷却相比，该冷却方式为间壁式换热，柜内循环空气温度高于环境空气温度，因此达到相同的柜内温度所需空气量更大，能耗也更高，约为风扇强制通风冷却的 1.5～2 倍，夏季高温天气也可能导致柜内超温，适用于温度适中的环境[21]。

需要指出的是，若采用冷冻水、有机制冷剂、低温压缩空气等作为户外柜热交换器的冷却工质，构建集中式温湿度调节系统，其控温的独立性和能效可以大幅提升。由于变电站安全要求高，水和制冷剂泄露可能产生安全风险。目前尚未见相关研究和应用的报道，还需对此类系统的运行特性进行深入研究，并通过技术经济分析对成本、能耗和安全性进行综合评估。

2.2.3　机柜空调控温

对于密闭式户外柜，还可以在机柜壁面上安装如图 3 所示的小型空调，对柜内温湿度进行调节控制。利用低温制冷剂吸收柜内空气热量实现降温除湿，同时机柜内还装有风扇，驱动内部空气流动，从而提高柜内温度调节效果，改善柜内温度均匀性。洪梅子等[22]通过现场实验对比了空调、风扇和热交换器三种控温方式对户外设备组件柜内最高温度的影响，发现利用空调并加大冷却空气流量和降低冷却空气温度可达到良好的柜内降温效果。王家军[8]认为机柜空调与热交换器相组合的温控方式，与仅采用机柜空调的温控方式相比，具有比较理想的控温效果和能耗优势，能延缓柜内设备的老化，保障设备运行可靠。

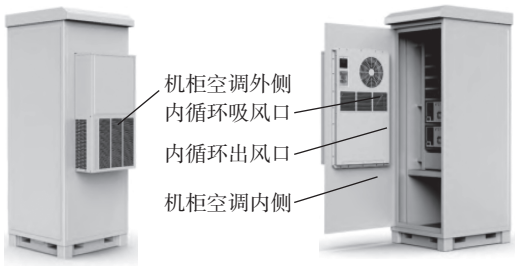

图 3　机柜空调结构

Fig. 3　Structure of air-conditioner for cabinet

空调型户外柜设计需要解决的关键问题是优化空调的变工况运行特性，提高不同环境温度下的适应性，降低能耗和噪声。比如在低环境温度下，空调的启动时间长，外风机的频繁启停会导致冷凝器性能变化和系统压力波动。通过优化冷凝器、蒸发器和风机选型，改进引流风道结构，调整运行方式，可以有效提高空调运行性能[23]。

空调型户外柜的制冷方式为主动式热传输，控制独立性强，在常见的环境温度范围内，都能将柜内温度控制在 30 ℃ 左右的理想水平；同时它的防护等级较高，可以防止外部污染物进入[21]。

户外柜空调控温技术也存在一些不足之处。由于空调是面向单个机柜一体化设计，不便于冗余备用布置和在线检修，空调故障会直接影响智能组件乃至一次设备的正常运行。另外，它的价格较高，在过渡季节不能直接利用环境冷空气进行温度控制；也需要解决好温度降低时柜内相对湿度上升的问题，以避免壁面凝露。

2.2.4 半导体制冷

半导体制冷户外柜是在控制柜上安装半导体制冷器。半导体制冷器（thermoelectric cooler，TEC）是指利用半导体的热电效应制取冷量的器件，又称热电制冷器。半导体制冷工作原理如图 4 所示。TEC 用导体连接一个 N 型半导体和一个 P 型半导体。接通电源后，一个接点附近产生电子空穴对，内能减小，温度降低，从柜内空气吸热，称为冷端；另一个接点附近因电子空穴对复合，内能增加，温度升高，并向环境放热，称为热端。李辉等[24]通过试验研究了 TEC 空调型户外汇控柜内高温散热和除湿效果，发现 TEC 空调在制冷的同时，还具备一定的除湿能力。

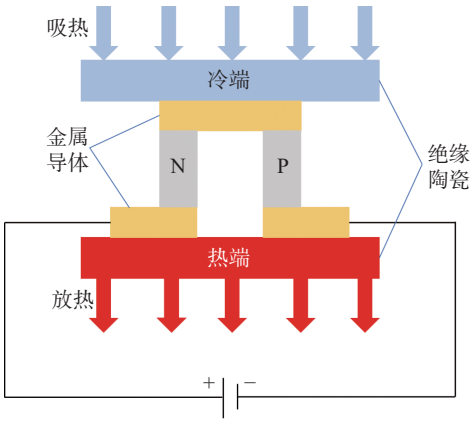

图 4 半导体制冷工作原理

Fig. 4 Working principle of thermoelectric cooler

半导体制冷器具有无噪声、无振动、不需制冷剂、体积小和质量轻等特点，且工作可靠，操作简便，易于进行冷量调节。但它制冷效率低，电耗量相对较大，而且半导体材料价格高，还必须使用直流电源，变压和整流装置往往不可避免，从而增加了电堆以外的附加体积。故半导体制冷器不宜大规模和大冷量使用，主要用于小制冷量和小空间的场合，目前在变电站户外柜中的应用还较少。

2.2.5 电加热

户外柜中安装电加热器是为了在柜内温度偏低时提高柜内温度。常见的方式是在柜内布置驱潮电阻[17]。王腾龙等[25]基于 ANSYS ICEPAK 软件分析了双加热器温控方案下双舱柜柜内温度分布，发现在该条件下柜内温度分布保持良好。朱云霄等[15]开展的户外柜低温保温实验表明，双层柜体夹层内贴保温板和加热器可以保证控制柜内智能二次设备在低温下正常运行。

2.3 湿度调节与防凝露

2.3.1 凝露的形成机理

凝露的形成与柜内空气的温度和露点温度有关。当空气温度高于露点温度时，两者温差越大，相对湿度越低，越不易形成凝露。如图 5 所示，若柜壁、元器件温度下降，使得与柜壁或元器件表面接触的空气温度降至露点温度，就会在表面形成凝露[13,26−27]。

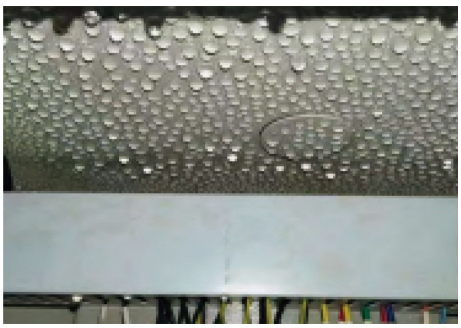

图 5 户外控制柜内因凝露产生的水珠

Fig. 5 Water droplets in the cabinet due to condensation

从现场户外柜运行情况看，柜内空气整体温度高于露点温度，而因局部壁面温度低于空气露点温度引起的结露容易被忽视，也不容易实时监测和防范。要防止凝露产生，控制好柜内空气温度、绝对湿度和柜壁温度是关键。

2.3.2 温度控制型防凝露方法

温度控制型防凝露主要是利用加热设备提高柜内空气温度，或利用保温隔热材料减少热耗，

从而提高柜壁温度，使得与壁面接触的柜内空气温度高于其露点，达到防止凝露形成的目的[26]。通常可采用柜壁敷设保温材料和柜内安装驱潮电阻的方式。周强强等[5]设计了一种基于硅橡胶加热器的变电站智能端子箱防凝露控制系统。试运行结果表明，该系统实现了对端子箱内环境集中监视、操作和管理以及电热器的在线监测，可以有效破坏凝露形成条件。

加热防凝露方法无法降低柜内空气的绝对含湿量，当柜体壁面温度随外部环境温度下降至柜内空气露点以下时，柜体壁面上仍然可能产生凝露。高温潮湿天气时，通过电加热进一步升温来降低相对湿度，也可能伴随柜内超温的风险。

2.3.3　湿度控制型防凝露方法

湿度控制型防凝露是通过除湿或提高设备密封性，使智能控制柜内空气中水蒸气含量降低或不再增长，从而控制柜内空气的绝对湿度，达到防止凝露形成的目的。目前主要有吸附除湿、冷凝除湿和膜除湿三种方法[23]。

吸附除湿主要利用干燥剂吸收水蒸气；冷凝除湿则会对水蒸气进行冷凝处理，以减少空气中水蒸气含量；膜除湿利用膜过滤器进行阻隔，只允许干空气通过。另外，有效封堵智能控制柜壁面上的进线孔和出线孔，可以减少水蒸气进入柜内，也是控制柜内湿度的有效措施[23]。在两种典型易凝露天气条件下，张鹏等[27]验证了冷凝除湿器和全密封柜体相配合的除湿方式，使柜内平均湿度和能耗分别降低了 5% 和 80%，除湿效果明显。孙庆峰等[28−29]搭建了气体绝缘开关设备（GIS）汇控柜半导体冷凝除湿模拟实验装置，考察了柜内温度对半导体冷凝除湿效果的影响，发现当柜内温度超过 35 ℃ 时，半导体冷凝除湿能力较弱，需辅以其他除湿手段；同时，需注意箱体内壁凝露所导致的柜内湿度下降假象；除湿能力值可以作为柜内除湿装置的启停策略。汪洋等[30]针对空调型户外柜湿度控制的突出问题，提出采用温湿度两路检测和增加温度补偿功能的空调优化启动模式来解决雨季低温高湿的问题。目前，尚未见有膜除湿设备在变电站户外柜上应用的案例。

2.3.4　温湿度耦合控制型防凝露方法

温湿度耦合控制型防凝露方法是将温度控制法和湿度控制法相结合，综合两者优点，防凝露效果更好[26]。张伟骏等[31]研制了基于加热控温和半导体制冷除湿装置的变电站端子箱防潮控温系统。该方法结合模糊 PID 技术，防潮效果明显。

3　户外柜温湿度控制综合应用典型案例

户外柜温湿度控制方案形式多样，应与变电站所处地域的气候条件相适应。江苏扬州某变电站，位于湖畔，智能控制柜预制舱内温度偏低，湿度较大，且拼舱式舱体存在缝隙，有外部水汽渗入，易产生凝露。采取在预制舱内增添除湿机、对舱体底框拼接缝隙处进行密封、冷湿天气开启舱内空调提高温度等措施，显著改善了柜内设备的工作环境[26]。

河北雄安新区某变电站所处地区夏季高温天气较多，户外柜所用空调故障率高，单用风扇难以达到理想目标温度，故采用空调与风扇联合调控柜内温湿度，如图 6 所示。两种技术互为备用，既能满足温度需求，又能达到节能目的。为了排放智能控制柜内部空气在蒸发器表面降温除湿产生的冷凝水，还在空调外机底部安装将这

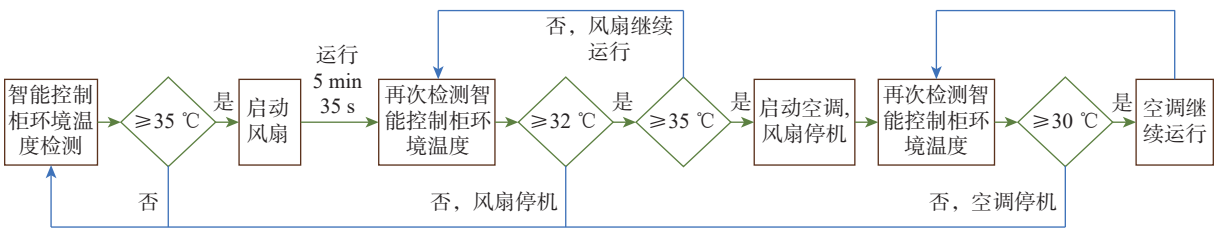

图 6　“空调 + 风扇”联合温控方案控制流程图[28]

Fig. 6　Flow chart of temperature control using air conditioner and fan[28]

部分冷凝水引出、收集并蒸发的部件，待收集到一定水位时自动开启加热装置使冷凝水蒸发汽化[32]，这样就无需另外布置排水管和排水沟。

东北、西北、蒙东等地区的部分变电站，所处地区冬季极其寒冷，最低户外气温普遍在−40 ℃ 左右。为了有效调节智能控制柜内温湿度，使用双层壳体结构，并在壳体夹层中添加低导热系数的隔热材料，以提升隔热保温性能；采用空调和热交换器双重配置，并在机柜下方安装带循环风扇的加热器，以保证加热量 100% 冗余，避免在低温环境下，加热器故障或柜门打开时，柜内温度低于允许使用温度[25]。

4 户外柜温湿度调节研究的不足与建议

智能变电站户外柜温湿度调节虽然已有相关研究和应用，但还不够深入和完善，不能充分满足变电站数字化和智能化发展的需要，还存在一系列需要进一步研究和解决的问题，主要包括：

(1)优化户外柜结构和热设计

目前在运的变电站户外柜内二次设备多，空间紧凑，流道复杂。有的产品在设计组屏阶段没有充分研究和验证柜内设备的热设计方案，控温除湿设备的选型、布置和运行控制不够精细合理；给已投入使用的户外柜加装分体式温湿度控制设备时，也难以优化冷量输入位置及柜内流场和温度场分布，导致柜内局部温度和湿度过高。深入研究户外柜产热特性和传热机理，匹配和优化热源布置及流场设计，提高柜内温湿度分布均匀性，是户外柜热设计的难点和重点。

(2)提高户外柜温湿度控制系统的可靠性

现有户外柜温湿度控制方案主要是风扇强制通风、风冷热交换器、机柜空调控温等，但上述方案存在一些不足之处，主要体现为户外柜在高温、湿热、严寒等恶劣气候条件下连续运行时不稳定，可靠性不够，特别是机柜风扇故障和柜内凝露引发电气事故的问题仍时有发生。而且现有户外柜调温除湿设备是面向单个机柜一体化设计，变电站全站户外柜内的调温除湿设备数量多，安装分散，控制粗放，不便于集中监测和自动控制，也不便于冗余备用布置和在线检修。调温除湿设备故障时直接影响智能组件乃至一次设备的正常运行。构建以冷风、冷冻水、直膨制冷剂或低温压缩空气等为载冷剂的新型户外柜温湿度集中控制系统方案，深入研究不同系统的变工况运行特性和技术经济性，努力减少户外柜内部的温湿度调控设备，将温湿度控制系统的设备尽量布置于柜外，并设计可靠的应急备用措施，提高运行可靠性和维护检修便利性，是进一步提高户外柜温湿度控制系统水平的关键。

(3)降低户外柜温湿度控制系统的能耗

目前智能变电站户外柜内环境参数可以通过柜内的温湿度传感器、变送器及二次智能组件上传变电站监控系统，但大多无法实现柜内分布式温湿度控制设备的实时控制(如温度、风量的实时调节)，也未针对柜内环境参数制定相应算法进行实时判断，以便更加节能地控制柜内环境温度。以目前在运的 220 kV 变电站为例，户外柜数量约为 30 个。按每个户外柜功率 1.2 kW 估算，全站分体式温湿度控制设备总功率约为 36 kW，整体能耗偏高。推进户外柜温湿度智能化运行调节，根据不同环境条件自动切换运行模式，优化运行参数，合理耦合光伏制冷、谷电蓄冷或其他节能技术，实现智能变电站绿色低碳运行是大势所趋。

5 结语

智能变电站户外柜内温湿度调控是维持智能设备长期稳定运行的重要基础，是变电站的数字化和智能化的关键技术之一。风机强制通风、热交换器换热、空调控温、半导体制冷除湿和电加热等技术都在户外柜温湿度控制中得到不同程度的应用，但可靠性、经济性和智能化水平尚待进一步提高。进一步开展户外柜热设计研究，优化户外柜结构和热设计方案，探索以冷风、冷冻水、直膨制冷剂或低温压缩空气等为载冷剂的新型户外柜温湿度集中控制系统，改进温湿度调节效果，降低运行能耗，提升运行可靠性、检修便利性和智能化水平，具有显著的现实意义和广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5)：180－187.

[2] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18)：59－62，79.

[3] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11)：57－61.

[4] 贾胜男, 李付永. 高压开关设备控制柜 (箱) 凝露原理及预防方法浅析 [J]. 科学技术创新, 2018(9)：39－40.

[5] 周强强, 李津. 变电站智能端子箱防凝露控制系统的研究与应用 [J]. 广东电力, 2013, 26(8)：73－77.

[6] 乔星金, 宋宇, 张强. 智能变电站户外控制柜环境调节一体化系统设计 [J]. 科技创新导报, 2018, 15(7)：63－64.

[7] 周亚龙, 娄悦, 朱东升, 等. 户外智能控制柜环境适应性研究 [J]. 电力勘测设计, 2017(1)：50－54.

[8] 王家军. 数字化变电站室外汇控柜温控方案探讨 [J]. 贵州电力技术, 2014, 17(4)：46－49.

[9] 朱道敏. 变电站箱柜加热驱湿装置控制方式分析 [J]. 科技与创新, 2014(21)：16－17.

[10] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会．智能变电站智能控制柜技术规范：DL/T 1881—2018[S]．北京：中国电力出版社，2019.

[11] 国家电网有限公司．国家电网公司变电运维管理规定(试行)：国网(运检/3)828—2017[S]．北京：国家电网有限公司，2017.

[12] 中国有色金属工业协会．工业建筑供暖通风与空气调节设计规范：GB 50019—2015[S]．北京：中国计划出版社，2015.

[13] 左涛, 张新太. 智能变电站高性能纤维预制舱防凝露设计 [J]. 宁夏电力, 2022(2)：24－30.

[14] 俞春林, 童星星. 基于晴天太阳辐射模型的电力户外机柜热估算与仿真 [J]. 华电技术, 2015, 37(9)：72－74，76.

[15] 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, 2013, 29(6)：18－22.

[16] 郭胜军, 朱云霄, 刘二恩. 户外机柜的热仿真分析 [J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2010(9)：56－58.

[17] 肖星, 李新海, 王振刚, 等. 220 kV 团结智能变电站交换机柜散热系统改进研究 [J]. 电工技术, 2022(7)：119－122，126.

[18] 刘雷, 张延. 湖南地区户外智能控制柜环境控制研究 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(6)：19－22.

[19] 吴雪峰, 刘艳敏, 施战辽, 等. 数字化变电站智能终端柜降温方案 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(5)：158－160.

[20] 田宇, 赵恒阳, 柯艳国, 等. 智能变电站智能控制柜散热策略研究 [J]. 电气应用, 2020, 39(6)：40－45.

[21] 王成智, 汪洋, 杜镇安, 等. 智能变电站户外智能控制柜微环境控制系统运行分析 [J]. 湖北电力, 2017, 41(12)：1－4，10.

[22] 洪梅子, 杜镇安, 黎恒烜, 等. 电气设备组件柜微环境控制技术优化策略研究 [J]. 湖北电力, 2018, 42(4)：12－15，54.

[23] 周金声, 陈国豪, 熊军, 等. 户外一体化机柜用空调的节能低噪设计 [J]. 制冷与空调, 2022, 22(12)：41－45.

[24] 李辉, 毛文奇, 潘华, 等. 户外智能汇控柜双 TEC 空调设计与实现 [J]. 湖南电力, 2019, 39(2)：1－6.

[25] 王腾龙, 丛树安, 李铁民, 等. 严寒及寒冷环境下智能变电站户外智能控制柜温控方案研究 [J]. 吉林电力, 2020, 48(2)：24－27.

[26] 陆朝阳, 李雪城, 刘广州, 等. 智能变电站预制舱防凝露技术研究 [J]. 电气技术, 2020, 21(11)：66－70.

[27] 张鹏, 周勇, 包威. 500kV 变电站 HGIS 汇控柜防潮技术改进 [J]. 电工技术, 2019(3)：120－121，126.

[28] 孙庆峰, 沈佳, 汤义勤, 等. GIS 汇控柜冷凝除湿控制策略研究 [J]. 高压电器, 2020, 56(12)：34－42.

[29] 孙庆峰, 沈佳, 汤义勤, 等. 汇控柜温湿度模拟试验系统开发及应用 [J]. 电工电气, 2019(3)：59－63.

[30] 汪洋, 王成智, 杜镇安, 等. 户外电气设备组件柜温湿度控制技术研究 [J]. 湖北电力, 2017, 41(5)：17－21.

[31] 张伟骏, 蔡新蕾, 高伟, 等. 变电站端子箱防潮控温系统的研制 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(21)：102－109.

[32] 郭朝云, 高晓静, 索志刚. 雄安电网变电站智能控制柜环境适应性研究 [J]. 电力勘测设计, 2020(10)：18－21.