

35 kV 高压配电室全智能防凝露系统的开发及应用

王喆¹, 李品德², 高伟¹, 高国梁¹, 李昱伟¹, 白洁¹, 张维军¹

(1. 国网陕西省电力公司榆林分公司, 陕西榆林 719000; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西西安 710075)

Development and Application of a Fully Intelligent Condensation Prevention System for 35 kV High-Voltage Power Distribution Room

WANG Zhe¹, LI Pinde², GAO Wei¹, GAO Guoliang¹, LI Yuwei¹, BAI Jie¹, ZHANG Weijun¹

(1. Yulin Branch of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Yulin 719000, Shaanxi, China;
2. Shannxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

ABSTRACT: Based on the analysis of the shortcomings of the current moisture-proof and dehumidification equipment in the distribution room, a full intelligent condensation prevention system is developed. The system is composed of PLC + HMI based central control unit, temperature and humidity transmitter array and peripheral execution equipment. Fully considering the anti condensation requirements of each area of the distribution room, a series of scientific control strategies are designed to realize the dehumidifier power failure protection, impulse current protection, equipment fatigue protection, low temperature protection, rapid cooling protection, alarm signal response and other functions. The product has been successfully applied in a 35 kV high voltage distribution room and achieved good results.

KEY WORDS: high-voltage power distribution room; switch cabinet; condensation; moisture-proof; dehumidification

摘要: 在分析目前配电室防潮除湿设备不足之处的基础上, 开发出高压配电室全智能防凝露系统。该系统由基于 PLC+HMI 的中央控制单元、温湿度变送器阵列及外围执行设备构成, 全面考虑了配电室各个区域的防凝露需求, 设计出一系列科学的控制策略, 实现了除湿机停电保护、冲击电流保护、设备疲劳保护、低温保护、快速降温保护、报警信号响应等功能。产品已成功应用于 35 kV 高压配电室并取得了良好效果。

关键词: 高压配电室; 开关柜; 凝露; 防潮; 除湿

内部凝露问题突出^[1-5], 原因大致如下。1) 环境湿度过高: 地下室, 江河湖海临近地区, 山谷等。2) 昼夜温差大: 山区及高海拔地区, 尤其是在高温高湿季节。3) 金属封闭紧凑型开关设备: 尤其是 35 kV 配电设备, 柜内空间相对狭小, 电场强度集中, 绝缘件爬电比距偏小。4) 变电站管理问题: 电缆沟内水汽串入, 配电室墙体失修出现渗水等。

开关柜内部凝露危害极大^[6-7], 其外观表现为断路器手车触头出现“铜绿”, 柜体内部及绝缘件表面出现凝露水珠等。长期的潮湿和凝露导致环氧绝缘件吸潮, 出现不可逆转的性能损伤, 并最终发展为对地放电等绝缘事故^[8]。此类事故在供电企业可以说是不胜枚举, 已经成为配电设备安全运行的一大障碍。某变电站开关柜内断路器因潮湿凝露引起事故后的照片如图 1 所示。

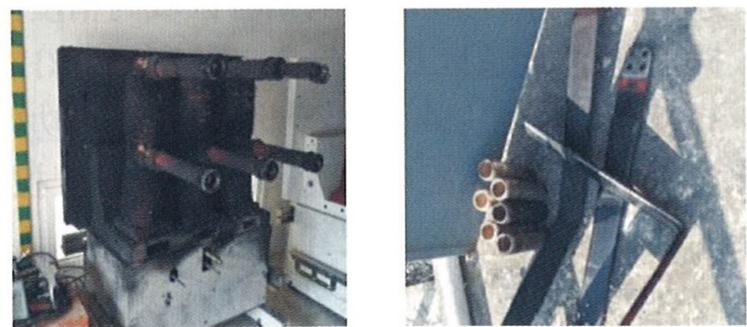


图1 某变电站 35 kV 开关柜因潮湿凝露而烧毁

Fig.1 The switch cabinet of a 35 kV transformer station is being burnout owing to condensation

对于上述高湿度或凝露问题, 传统除湿手段难以奏效^[8], 具体如下。1) 开关柜用传统温湿度控制器: 通过提高柜内温度降低柜内相对湿度, 并未降低柜内空气的含水量, 一旦停止加热或环境温度下降

我国幅员辽阔, 变电站自然条件差异很大, 一些变电站的高压配电室特别是 35 kV 配电室开关柜

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC0809400)。

Project Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC0809400).

时,潮湿空气反而会迅速凝露。2) 基于半导体冷凝技术的配电柜除湿装置:通过局部制造凝露条件使柜内潮湿空气凝结成水并直接排出柜外,逐渐减少柜内的湿度抑制凝露现象的产生。此类装置除湿效率较低,一般只能满足 $1\sim 3\text{ m}^3$ 的密闭空间除湿的要求。但由于 $10\text{ kV}/3\text{ m}^3$ 或 $35\text{ kV}/9\text{ m}^3$ 开关柜的柜内空间较大,而且柜外湿气还会不断进入柜内,造成除湿效果大打折扣。不仅如此除湿设备由于“小马拉大车”极易导致自身疲劳损坏。3) 综合除湿系统:就是对整个配电室的环境进行改造,通过改变配电室的环境条件,试图间接调节开关柜内部的湿度。目前此种方案虽然有了一定的应用,但由于在硬件设置及策略优化方面尚有不足,导致开关柜内部、电缆沟内部、母线桥架内部等存在一些除湿死区,实际效果并不理想。

针对上述问题,本文提出一种 35 kV 高压配电室全智能防凝露系统的开发方法。实验结果表明,用所提方法设计的高压配电室全智能防凝露系统对高压配电室开关柜内部的凝露问题有很好的效果,降低了配电室及开关柜内部的湿度,避免了凝露问题的发生,为电力生产提供了安全保障。

1 高压配电室全智能防凝露系统的基本方法

1.1 基本方法构成

如图 2 所示,基本方法构成如下。

1) 中央控制单元:核心设备,完成数据通讯、分析、计算及无源接点信号检测,给各外围执行设备提供配电及启停命令。

2) 变送器阵列:完成变电站各区域高精度温湿度数据采集,温度精度 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$,湿度精度 $\pm 3\%\text{RH}$ 。

3) 室内除湿机:外围执行设备,采用大功率工业除湿机,完成高压配电室内部空间的湿度控制,根据配电室空间大小合理配置参数^[9]。

4) 地沟风机或除湿机:外围执行设备,完成电缆沟通风及除湿,根据电缆沟具体情况合理配置。

5) 柜顶及母线桥架风机:外围执行设备,采用 $220\text{ V}/80\text{ W}$ 军工轴流风机,完成开关柜及母线桥架空气循环,使开关柜及母线桥架内部空气与高压配电室内空气湿度保持一致。

6) 换气风机:外围执行设备,带自闭逆止阀,用于条件许可的情况下进行配电室内外空气交换,节

省室内除湿机电能消耗。

7) 备用设备:外围执行设备备用通道,可选配空调机或暖风机等。

8) 电动窗户:外围执行设备,用于配电室透气窗户的改造,用于接通或隔离室内外空气,便于保持室内环境的独立性。

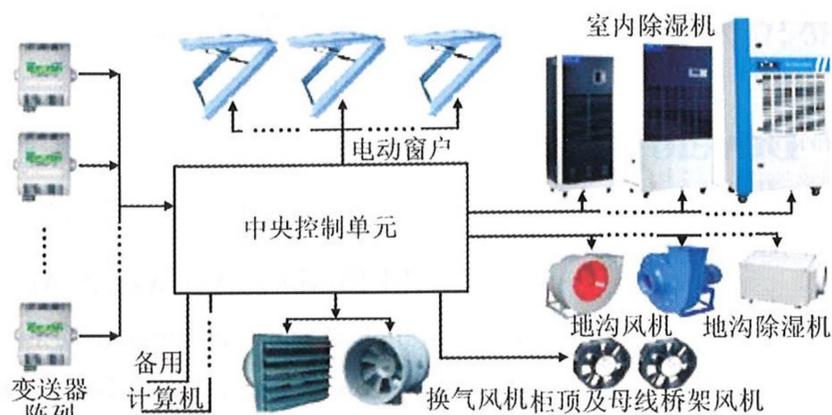


图2 高压配电室全智能防凝露系统的基本方法构成
Fig.2 Basic method construction of the full intelligent condensation prevention system for high voltage distribution room

可见,高压配电室全智能防凝露系统由中央控制单元、变送器阵列及外围执行设备构成。中央控制单元对变送器阵列采集的数据进行运算及分析,并根据预定的策略对各外围执行设备进行启停控制,使配电室内各个区域的湿度保持在可以接受的安全范围,从而避免在开关柜或相关绝缘件表面形成凝露,确保电气设备不会因凝露而导致绝缘性能劣化。

1.2 原理方法

采用专业的变送器阵列完成变电站各区域的温度 T 及湿度 U 的数据采集,这里的 U 为相对湿度,即实际的空气水气分压 E 和同温度下饱和水气压力 E_w 的百分比,表达式如下:

$$U = \text{RH}(\%) = E/E_w \times 100\% \quad (1)$$

由于 E_w 随环境温度升高而增大,所以在 E 一定的情况下,温度升高则相对湿度下降,温度下降则相对湿度升高。若气温持续降低,空气中的水分最终将达到饱和值,于是出现凝露,即多余水分从空气中“析出”,以水珠形式凝结在温度较低的开关柜或绝缘件表面,开始结露的温度称为露点。也就是说, E 和露点是一一对应的关系,具体公式如下^[10]:

$$T_d = b \times \lg(E/E_0) / [a - \lg(E/E_0)] \quad (2)$$

式中: $E_0=6.1078\text{ hPa}$,表示 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的饱和水气压力; a, b 为常数; T_d 为露点。

那么,已知 U ,如何才能计算出 E 呢?显然要先计算出 E_w 才行。 E_w 和环境温度 T 是一一对应的,

具体公式如下:

$$E_w = 6.11139 \exp[A(T - T_1)/(T - B + CT^2)] \quad (3)$$

式中: \exp 为以 e (自然对数的底) 为底的指数算符; T 为气温, K, $T = 273.16 + t$; T_1 为水的三相点温度, 其值为 273.15 K。

显然, 根据变送器阵列采集的环境数据, 我们可以知道环境温度 T 、相对湿度 U 、水蒸气分压 E 、饱和蒸汽压力 E_w 和露点 T_d 等关键信息, 进而设计出配电室环境控制策略, 从而利用中央控制单元有效控制各外围执行设备, 保证各区域通风和除湿的协调动作、高效运行。

2 高压配电室全智能防凝露系统的设计与开发

2.1 中央控制单元

1) 硬件框图。硬件框图如图 3 所示, 中央控制单元主要包括可编程逻辑控制器 PLC、人机界面 HMI、继电器阵列、配电单元、无源接点输入信号及直流电源模块。PLC 与 HMI 之间通过 RS232 接口连接, HMI 与温湿度变送器阵列间通过 RS485 接口连接, PLC 通过中间继电器阵列及配电单元控制各外围执行设备的启停。其中, 外围执行设备的配置全面考虑了电气回路的各个环节, 特别是开关柜和母线桥架这些容易被忽视的区域^[1]。

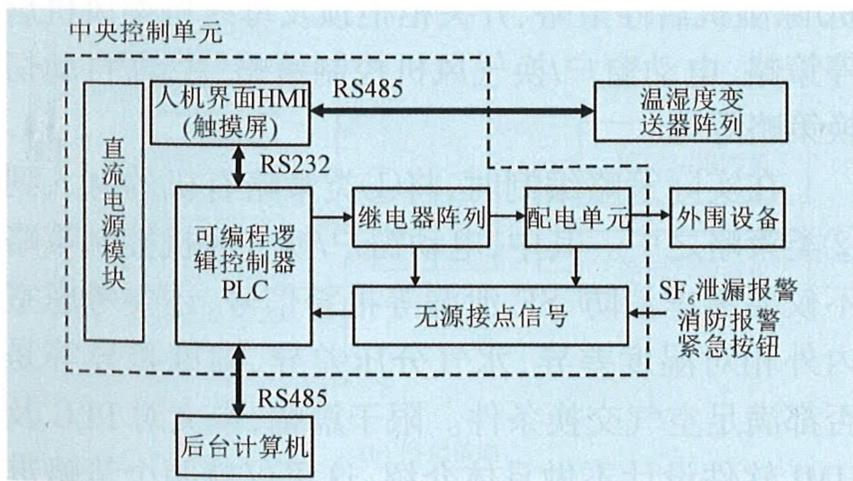


图3 中央控制单元硬件框图

Fig.3 The block diagram of the hardware of the center control unit

2) 人机界面 HMI。人机界面 HMI 采用 7 吋真彩色触摸屏, 分辨率 800×480 , Flash 128 MB + RAM 64 MB + 掉电 16 MB。基于 HMI 的软件设计平台, 设计了友好的人机交互界面。其中在菜单上设置了设备状态、监测数据、历史数据、报警信息、相关曲线、参数设置、时钟设置等功能按键, 通过操作界面上的按键可以实现对应的显示功能。图 4 为

操作“设备状态”按键之后的显示画面, 通过操作此画面上的按钮可以实现对外围执行设备的手动控制功能, 这为设备的调试提供了便利。用户通过本 HMI 不仅可以随时查看各外围执行设备状态及具体环境检测数据, 还可以查看多达 200 条的历史报警信息, 或查看前 30 天的历史数据、趋势曲线, 或设置除湿机启停条件、日最大累计运行时间及时钟等参数。

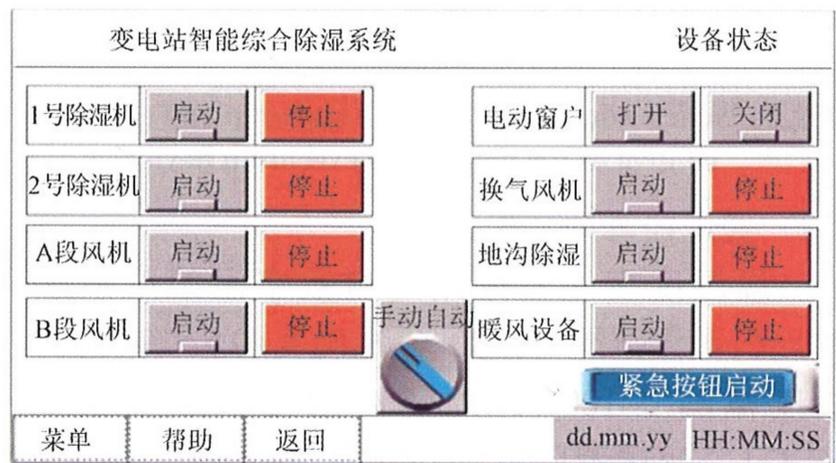


图4 HMI的设备状态界面

Fig.4 Device status interface of HMI

3) 配电单元。配电单元原理示意图见图 5。

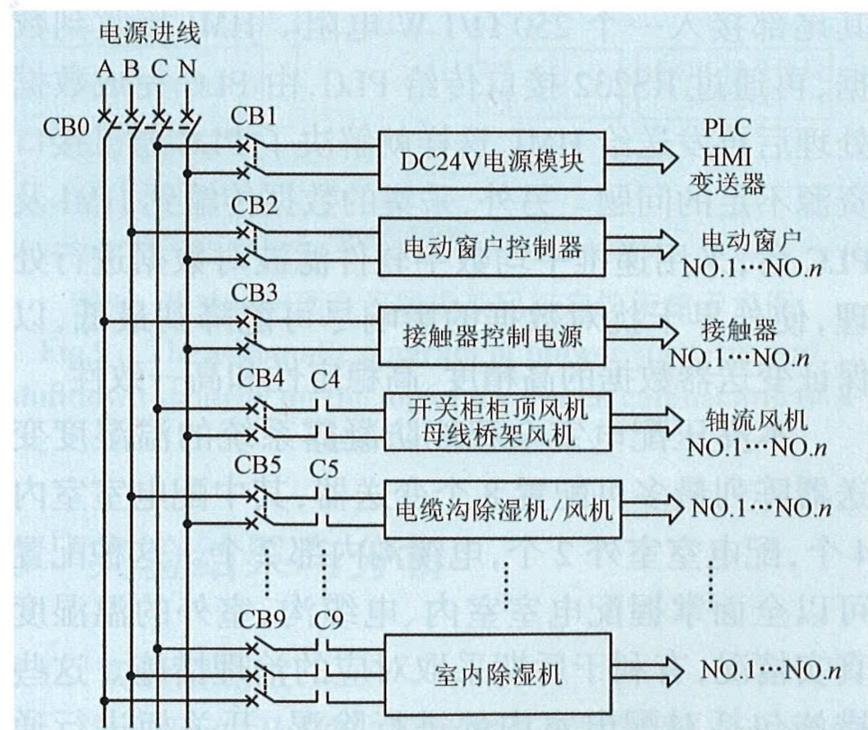


图5 配电单元示意图

Fig.5 Sketch of the distribution unit

380 V 三相电源进线, CB0 为进线总开关, 单相 220 V 负荷均匀配置到各相, 三相负荷主要针对大功率室内除湿机。CB1—CB9 为支路开关, C4—C9 为接触器。电动窗户控制器及各接触器控制线圈受控于 PLC, 即 PLC 通过控制电源供给来控制电动窗户及各外围执行设备的启停, 控制原理见图 6。接触器 C5 的控制线圈的供电受控于 PLC 的一个输

出接点,此输出接点断开时 C5 即断开,反之则 C5 吸合,其他接触器的控制与此相同。

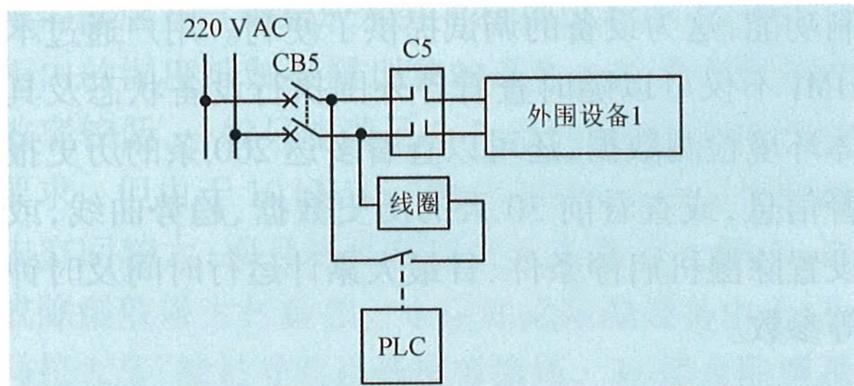


图6 外围执行设备启停控制原理图

Fig.6 Schematic diagram of the start-up and shutdown control of the peripheral execution device

2.2 变送器阵列及相关接线

温湿度变送器采用进口数字温湿度敏感元件^[12-13],测温范围 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,准确度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}@ (25\text{ }^{\circ}\text{C})$,湿度范围 $0\sim 100\% \text{ RH}$, $\pm 3\% \text{ RH}@ (20\% \sim 80\% \text{ RH}/25\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。变送器阵列通过标准 MODBUS 协议/485 接口与人机界面设备 HMI 连接在一起。为了获得良好的抗回波扰动性能,在工程上建议采取如图 7 所示的链式接法,485 引线串联引入各变送器,且在其尾部接入一个 $250\ \Omega/1\ \text{W}$ 电阻。HMI 接收到数据,再通过 RS232 接口传给 PLC,由 PLC 完成数据处理后再发送给 HMI,这样就解决了 PLC 通讯接口资源不足的问题。另外,采集的数据传输到 HMI 及 PLC 后,采用递推平均数字软件滤波对数据进行处理,使外界干扰对数据的影响尽可能降到最低,以保证变送器数据的高精度、高稳定性和高一一致性。

本高压配电室全智能防凝露系统的温湿度变送器阵列最多可配置 8 个变送器,其中配电室室内 4 个,配电室室外 2 个,电缆沟内部 2 个。这种配置可以全面掌握配电室室内、电缆沟、室外的温湿度真实情况,有利于后期采取对应的治理措施。这些措施包括对配电室内部进行除湿、开关柜进行通风、母线桥架进行通风、电缆沟进行通风、室内室外

换气等。

2.3 外围执行设备

合理配置外围执行设备是本高压配电室全智能防凝露系统的关键环节之一。配置外围执行设备的基本原则是:简单有效、不留死角。如前所述,外围执行设备主要包括工业除湿机、电缆沟风机/除湿机、开关柜柜顶风机、电动窗户、换气风机、空调机/暖风机等。本系统外围执行设备配置的特点:

- 1) 根据配电室内部空间大小确定室内除湿机的参数选型;
- 2) 构建了开关柜柜顶通风系统;
- 3) 构建了母线桥架通风系统;
- 4) 构建了室内室外空气交换系统;
- 5) 根据电缆沟形态特征,优先考虑通风而不是除湿,可以更有效地保证运行效果;
- 6) 设置备用通道,为用户采用空调机/暖风机提供可能。

2.4 控制策略

为了充分发挥高压配电室全智能防凝露系统的硬件效能,构建科学的控制策略尤为关键。这些策略是 PLC 软件编制的依据,具体包括:① 除湿机停电保护策略、冲击电流保护策略、设备疲劳保护策略、低温保护策略、快速降温保护策略、报警信号响应策略等等;② 室内除湿机启停策略、电缆沟风机/除湿机启停策略、开关柜柜顶及母线桥架风机启停策略、电动窗户/换气风机控制策略、手动/自动切换策略等等。

在实际策略编制时,将①类策略有机的融入到②类策略之中。其中,电动窗户/换气风机控制策略不仅要考虑消防、SF₆ 泄漏等报警信号,还要考虑室内外相对湿度差异、水气分压差异、温度差异等是否都满足空气交换条件。限于篇幅,本文对 PLC 及 HMI 软件设计不做具体介绍,这里仅就两个策略进行简单说明。

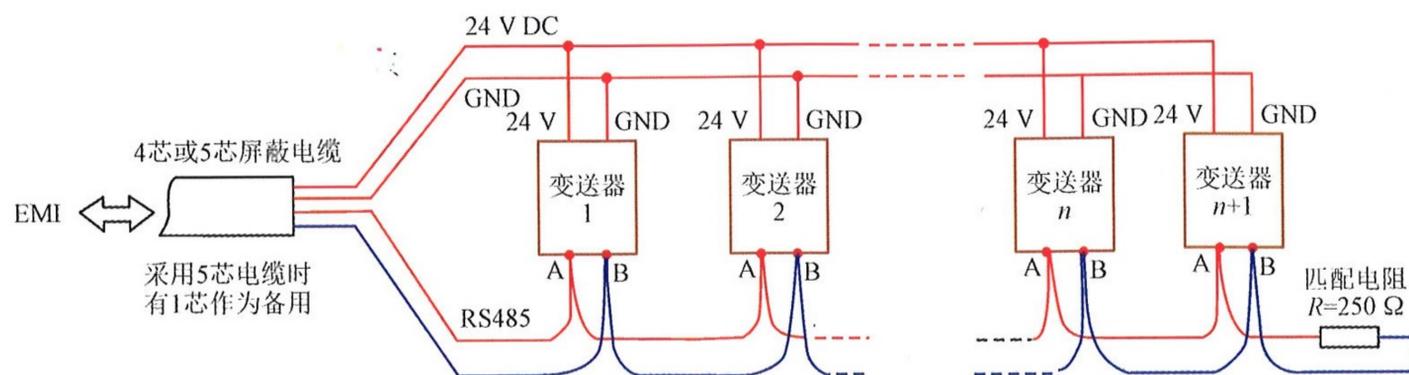


图7 温湿度变送器阵列接线示意图

Fig.7 Wiring schematic drawing of the temperature-humidity transmitter array

2.4.1 室内除湿机启停策略

室内除湿机启停策略如图 8 所示。

1) 基本判据:换气风机关闭、室内环境相对封闭时, $U > 60\%RH$ 启动, $U < 50\%RH$ 停运, U 的启停窗口可以通过 HMI 的参数设置菜单进行设定。

2) 压缩机停电保护:除湿机停运后,在间隔安全时间 $T_{安全}$ 内不得再次启动。

3) 冲击电流保护:两组除湿机不得同时启动,间隔时间 20 s。

4) 设备疲劳保护:24 h 内除湿机累计运行时间应小于 $T_{设定}$,具体通过 HMI 的参数设置菜单进行设定。

5) 低温保护:除湿机一般在环境温度低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近将会失去除湿能力,此时开机只会无谓地耗电,所以默认环境温度低于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 自动停运。

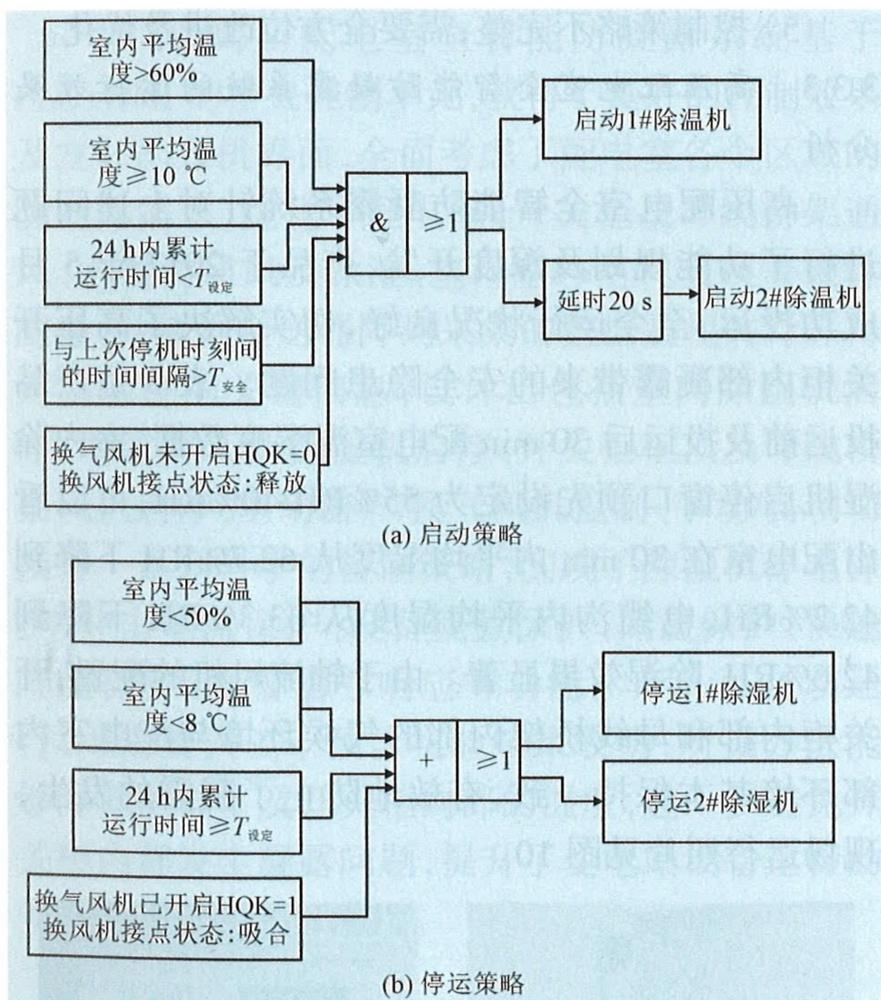


图 8 室内除湿机启停策略示意图

Fig.8 The sketch of start-up and shutdown strategy of the indoor dehumidifier

2.4.2 开关柜柜顶及母线桥架风机启停策略

开关柜柜顶及母线桥架风机启停策略如图 9 所示。

1) 定时启动:每小时至少运行 5 min。

2) 关联启动:室内除湿机工作或换气风机开启时,启动运行。

3) 有条件关联停运:室内除湿机停运或换气风

机停运。

4) 快速降温:满足快速降温条件时,启动运行。

5) 疲劳保护:24 h 内的累计运行时间小于规定值。

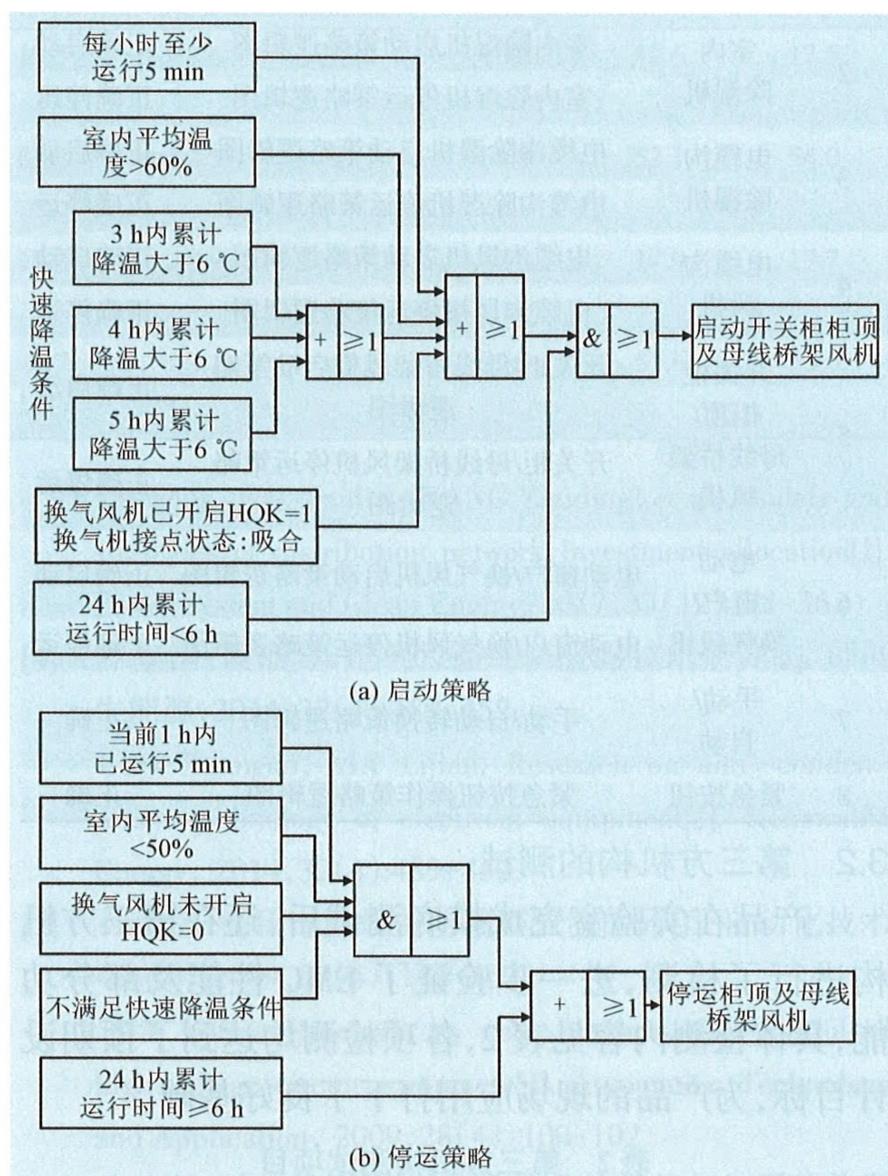


图 9 开关柜柜顶及母线桥架风机启停策略示意图

Fig.9 The schematic diagram of blower start-up and shutdown strategy on the top of the switch cabinet and of a bus bar bridge

3 实验结果与分析

3.1 实验室测试

产品硬件及软件开发完毕后,需要一系列的测试来验证。其中,很多测试项目需要对应的温湿度环境才能进行,为此在实验室搭建了一个大约 20 m^3 的简易小型气候室,将这个小室分成 3 个相对封闭的区域来模拟配电室内、配电室外及电缆沟,各区域分别配置了加湿器、暖风机、冷风机、冰袋、小型轴流风机、变送器等设备。测试项目一览表见表 1。这些测试项目对检验硬软件的正确性和各项策略设计的有效性起到了至关重要的作用。

表1 实验室测试项目一览表
Table 1 Table of laboratory test items

序号	检测项目	检测依据	检验结果
1	产品硬件检查	技术条件、接线图、原理图	正确
2	室内除湿机	室内除湿机启动策略逻辑图	正确启动
		室内除湿机停运策略逻辑图	正确停运
3	电缆沟除湿机	电缆沟除湿机启动策略逻辑图	正确启动
		电缆沟除湿机停运策略逻辑图	正确停运
4	电缆沟风机	电缆沟风机启动策略逻辑图	正确启动
		电缆沟风机停运策略逻辑图	正确停运
5	开关柜/母线桥架风机	开关柜/母线桥架风机启动策略逻辑图	正确启动
		开关柜/母线桥架风机停运策略逻辑图	正确停运
6	电动窗户/换气风机	电动窗户/换气风机启动策略逻辑图	正确启动
		电动窗户/换气风机停运策略逻辑图	正确停运
7	手动/自动	手动/自动转换策略逻辑图	正确
8	紧急按钮	紧急按钮操作策略逻辑图	正确

3.2 第三方机构的测试

产品在实验室完成摸底测试后,还在第三方机构进行了检测,进一步验证了 EMC 性能及部分功能,具体检测内容见表 2,各项检测均达到了预期设计目标,为产品的现场应用打下了良好基础。

表2 第三方机构测试项目
Table 2 Test items of the third party

序号	检测项目	检测依据	参数	检验结果
1	静电放电抗扰度试验	GB/T 17626.2—2006	3级	符合
2	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	GB/T 17626.4—2008	3级	符合
3	浪涌(冲击)抗扰度试验	GB/T 17626.5—2008	3级	符合
4	工频磁场抗扰度试验	GB/T 17626.8—2006	5级	符合
5	除湿机自动启停试验	Q/EPCS2.00—2018		符合
6	电缆沟风机自动启停试验	Q/EPCS2.00—2018		符合
7	“紧急按钮”模式试验	Q/EPCS2.00—2018		符合
8	“手动”模式试验	Q/EPCS2.00—2018		符合

3.3 工程应用测试

3.3.1 依托工程情况

依托工程为榆林供电公司某 110 kV 变电站的 35 kV 配电室。该配电室安装了 16 面 35 kV 高压开关柜,单母分段接线,室内空间大约为:长 25 m×宽 10 m×高 7 m。凝露问题非常严重,主要原因为:

1) 地下水位高,电缆沟水汽渗入,导致配电室

湿度居高不下;

2) 夏季湿度高且昼夜温差大;

3) 已安装的综合除湿系统效果不佳。

曾经采取了包括增加大功率除湿机、墙体防水处理、地下水隔离处理、定期人工通风等一系列补救措施,但依然不能彻底摆脱凝露困扰。

3.3.2 问题分析

基于上述情况,经过细致的现场考察并综合分析,配电室外围的水气封堵方面不存在缺陷,主要问题在于业主原综合除湿系统存在如下技术问题:

1) 电缆沟采用小型除湿机,送风距离短,环境改善效果差;

2) 开关柜内部相对封闭,与配电室无空气交换;

3) 母线桥相对封闭,与配电室无空气交换;

4) 配电室室内、室外无空气交换;

5) 控制策略不完整,需要全方位改进及优化。

3.3.3 高压配电室全智能防凝露系统的运行效果分析

高压配电室全智能防凝露系统针对上述问题进行了功能规划及深度开发,产品于 2017 年 5 月成功投运,至今运行状况良好,切实解决了高压开关柜内部凝露带来的安全隐患问题。表 3 是产品投运前及投运后 30 min 配电室温湿度数据,室内除湿机启停窗口预先设定为 55%RH/40%RH,可以看出配电室在 30 min 内平均湿度从 62.7%RH 下降到 42.2%RH,电缆沟内平均湿度从 63.3%RH 下降到 42.6%RH,除湿效果显著。由于轴流风机的配置,开关柜内部和母线桥架内部的气候环境与配电室内部环境基本保持一致,有效地防止了凝露的发生,现场运行照片见图 10。



图10 高压配电室全智能防凝露系统现场运行照片
Fig.10 The field operation photo of the fully intelligent condensation prevention system in high voltage distribution room

表3 防凝露系统投运前后的数据比较

Table 3 Data comparison before and after the putting into operation of the condensation prevention system

监测项目		35 kV 高压配电室各区域变送器监测数据							
		室内区域			电缆沟区域		室外区域		
		测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8
产品投运 前数据	实时温度/°C	18.9	18.9	19.3	18.6	18.4	18.2	17.6	17.5
	平均值/°C	18.9			18.3		17.5		
	实时湿度/%RH	62.3	62.5	62.5	62.9	62.1	64.0	52.1	54.0
	平均湿度/%RH	62.7			63.3		53.0		
产品投运后 30 min 数据	实时温度/°C	18.9	18.9	19.3	18.9	18.4	18.2	17.9	17.7
	平均值/°C	19.0			18.3		17.8		
	实时湿度/%RH	42.5	41.5	41.7	43.1	45.2	39.9	51.6	53.0
	平均湿度/%RH	42.2			42.6		52.3		

4 结语

35 kV 高压配电室全智能防凝露系统基于 PLC+HMI 的中央控制单元,获得了良好的控制效果及友好的人机界面,全面考虑了配电室各个区域的防凝露需求,优化了配电室、开关柜及母线桥架通风、电缆沟通风及除湿、室内室外空气交换等硬件配置,并依据变送器阵列采集的数据及相关计算得到温湿度度的关键信息,设计出包括室内除湿机启停、电缆沟风机/除湿机启停、开关柜柜顶及母线桥架风机启停、电动窗户/换气风机控制、手动/自动切换等一系列科学的控制策略,实现了除湿机停电保护、冲击电流保护、设备疲劳保护、低温保护、快速降温保护、报警信号响应等功能。产品可自动运行,不需要人工干预。实验结果表明,所提方法能够降低配电室及开关柜内部的湿度,进一步避免开关柜内部发生凝露问题,提升了变电站设备运行的安全性和供电的可靠性。

参考文献

- [1] 王琪,李志全,王建平,等.开关柜防凝露最优控制方法研究[C]//山东电机工程学会论文集.山东:山东电机工程学会,2011:65-72.
- [2] 温洪曾.高压配电室防潮除湿方法及治理措施[J].中国新技术新产品,2013(17):135-136.
WEN Hongzeng. Damp-proof and dehumidification methods and treatment measures for high voltage distribution room[J]. China's New Technologies and Products, 2013(17):135-136.
- [3] 余松,吴延琳,王主丁,等.配电网投资分配的模型策略[J].电网与清洁能源,2017,33(12):28-36.

YU Song, WU Yanlin, WANG Zhuding, et al. Models and strategies of distribution network investment allocation[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12):28-36.

- [4] 罗宣国,夏丽建.电气设备的防凝露技术研究[J].可再生能源,2014,32(4):489-452.

LUO Xuanguo, XIA Lijian. Research on anti-condensation technology of electrical equipment[J]. Renewable Energy, 2014, 32(4):489-452.

- [5] 孙亚芬.高压电路设备防凝露控制的研[J].自动化技术与应用,2009,28(4):100-102.

SUN Yafen. Research on anti-condensation control of high voltage circuit equipment[J]. Automation Technology and Application, 2009, 28(4):100-102.

- [6] 李生权,钱文姝.智能变电站技术的现状与发展趋势研究[J].电网与清洁能源,2017,33(12):59-64.

LI Shengquan, QIAN Wenshu. Research on the current situation and development trend of smart substation technology[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12):59-64.

- [7] 黄强,陈贵亮,张维静,等.变电所高压开关柜室防潮除湿方法及治理措施[J].安徽电力,2012(3):37-39.

HUANG Qiang, CHEN Guiliang, ZHANG Weijing, et al. Damp-proof and dehumidification methods and treatment measures for HV switchgear room of substation[J]. Anhui Electric Power, 2012(3):37-39.

- [8] 韩旭.变电站综合自动化系统的集成[J].电网与清洁能源,2015,31(10):66-70.

HAN Xu. Integration of substation integrated automation system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10):66-70.

- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.除湿机:GB/T 19411-2003[S].北

(下转第29页)

- [24] 滕德云,滕欢,刘鑫,等.基于改进鲸鱼优化算法的多目标无功优化调度[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(3):123-128,136.

TENG Deyun, TENG Huan, LIU Xin, et al. Multi-objective reactive power optimization dispatch based on improved whale optimization algorithm[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):123-128.

- [25] 向萌,左剑,王文林,等.基于改进量子遗传算法的配电网无功优化研究及应用[J].电网与清洁能源,2017,33(8):32-37.

XIANG Meng, ZUO Jian, WANG Wenlin, et al. Reactive power optimization of the distribution network based on the

improved quantum-inspired genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8):32-37.

收稿日期:2019-08-08。

作者简介:

刘佳陇(1985—),男,工程师,研究方向为配电网运行管理;

叶保璇(1979—),男,高级工程师,研究方向为电气工程管理;

张诗建(1994—),男,工程师,研究方向为电力系统运行优化与控制;

李钦豪(1989—),男,博士,研究方向为主动配电网无功电压控制。

(编辑 冯露)

(上接第19页)

京:中国标准出版社,2003.

- [10] 国防科学技术工业委员会.军用设备气候极值总则:GJB 1172.1-91[S].北京:国防科学技术工业委员会,1991.

- [11] 王延盛,顾博超.电气开关柜防凝露通风除湿系统[J].农村电气化,2017(1):29-30.

WANG Yansheng, GU Bochao. Anti-condensation ventilation dehumidification system for electric switch cabinet[J]. Rural Electrification, 2017(1):29-30.

- [12] 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.

ZHOU Qiangqiang, LI Jin. Research and application of anti-condensation control system for intelligent terminal box in substation[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26

(8):73-77.

- [13] MIAO Y, SONG J, LIU H, et al. Research on power electronic transformer applied in AC/DC hybrid distribution networks[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(3):396-403.

收稿日期:2019-09-16。

作者简介:

王喆(1980—),男,本科,高级工程师,研究方向为电力系统及电力设备的分析与保护;

李品德(1966—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为高压电器;

张维军(1981—),男,本科,高级工程师,研究方向为高压电器设备缺陷的研究及整治。

(编辑 冯露)