

[变电站]

110 kV全模块化高性能纤维预制舱式变电站消防研究

文/左涛¹ 李敏² 朱西平³ 宋英杰¹

1. 乐山一拉得电网自动化有限公司; 2. 乐山师范学院; 3. 西南石油大学

以四川省乐山市某110 kV全模块化高性能纤维预制舱式变电站为例,从火灾危险性判定、防火间距识别、火灾自动报警系统设计、自动灭火系统设计、消防给水系统及消防车道设计等方面,研究了该类预制舱式变电站的防火消防问题,提出了防火消防设计的基本原则,为解决预制舱式变电站的消防问题提供了有价值的借鉴和参考。

随着我国国民经济和社会的发展,在110 kV电压等级变电站新建工程中,采用全模块化预制舱式变电站建设模式的工程越来越多,但是传统的观点认为变电站的模块化预制舱是设备,而且目前国家还没有关于预制舱式变电站的防火验收标准,不受消防规范的限制,因此国内变电站的预制舱大多按照设备标准进行验收,规避了建筑消防验收内容,存在消防隐患。

实际上,以钢结构及轻质板材作为预制舱体围护结构时,防火性能是非常差的。尽管钢结构具有质量轻、强度高及对电磁的屏蔽性好等诸多优点,但是钢材的常温热导率高达 $58.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,升温或遇火时热导率更高,仅需0.25 h(即钢材的耐火极限),钢结构预制舱就有塌陷破坏的可能,因此钢结构的预制舱式变电站存在严重的火灾隐患。随着变电站消防验收的日益严格,把变电站预制舱当成设备,规避消防规范的限制和验收的观点和做法是错误的,应予以纠正和预防。变电站预制舱的生产企业应该在方案设计和生产制造时考虑消防措施,行业主管部门也应该加强预制舱式变电站的消防监

督和验收。

近年来,随着新技术、新材料和新工艺的出现及应用,为克服钢结构预制舱防火性能差、耐腐蚀性差及保温隔热性能差等缺陷,出现了一种以高性能纤维(如玄武岩纤维)为改性掺料的非金属复合材料预制件,该预制件集中了高性能纤维、高分子材料和金属钢材的性能优势,采用该预制件为预制舱体围护结构的非金属预制舱具有燃烧性能等级高、耐火性能长、耐腐蚀性好及隔热性能好等良好物理性能,在电力变电站火灾消防方面展现出独特优势。本文以四川省乐山市某110 kV全模块化高性能纤维预制舱式变电站为例,对变电站防火消防问题进行了分析研究,为此类预制舱式变电站的防火消防问题提供了有价值的借鉴和参考。

工程规模及建设模式

该变电站工程规模:主变压器型号为SZ11-50000/110 $110 \pm 8 \times 1.25\%/10.5 \text{ kV}$ YND11, $U_K=17\%$ 含中性点、电流互感器1台;110 kV间隔7个;10 kV间隔为单母线分段,18个;10 kV无功补偿装

基金项目:2020年四川省科学技术厅第一批省级科技计划项目——220 kV环保型模块化智能变电站(No. 2020ZHCP0024)

置为 $2 \times 4\ 800\ \text{kvar}$ ； $10\ \text{kV}$ 接地变电站兼站用变电站为 $1 \times 700\ \text{kV}\cdot\text{A}$ （站用变电站 $100\ \text{kV}\cdot\text{A}$ ）。

建设模式以变电站高性能纤维预制舱为重要承载，将全站设备划分为 $110\ \text{kV}$ GIS组合电器预制舱、主变压器预制舱、 $10\ \text{kV}$ 开关设备预制舱、二次组合设备预制舱、电容器成套装置预制舱、接地变消弧线圈预制舱和生活预制舱7个模块化功能预制舱。舱体、舱顶围护结构均采用玄武岩纤维复合预制件，通过干式工法拼装而成。预制舱内部电力设备在工厂内完成制作、组装、配线和调试等工

作，以模块化箱房形式整体配送至变电站建设现场进行吊装、组合和就位。变电站围墙、防火墙、电缆沟、预制舱基础和变压器基础等构筑物均采用预制方式，以简化施工过程，同时实现变电站模块化装配、标准化工厂组装和系统集成化建设，最大限度减少了现场“湿作业”和对当地环境的影响，是一种创新的快速配送式、快速装配式变电站建设模式。

变电站鸟瞰图如图1所示。



图1 $110\ \text{kV}$ 全模块化高性能纤维预制舱式变电站鸟瞰图

全模块化预制舱式变电站消防设计重点问题

全模块化预制舱式变电站不同于常规土建变电站和钢结构变电站，地面以上的全部建筑物均为模块化预制舱式结构，在防火消防设计中首先有两个重点问题需要研究清楚：一是变电站模块化预制舱的火灾危险性（包括耐火等级）问题，它是预制舱式变电站消防设计的基础；二是预制舱防火间距问题（包括预制舱与预制舱之间、主变压器与预制舱之间、主变压器与其他带油电气设备之间等）。

1. 变电站预制舱火灾危险性

（1）预制舱火灾危险性的判定

预制舱式变电站防火消防设计的基础和关键在于火灾危险性的判定。预制舱式变电站的建设流程为：在工厂内生产高性能纤维预制舱体，根据变电

站要求制作、组装、配线和调试舱内一次设备、二次设备和通信等电力设备，之后以模块化箱房形式整体或分段配送至变电站建设现场，通过机械化吊装、组合和就位在事先制作好的水泥基础上，联调验收合格后带电投运。按照GB 50016—2014(2018年版)《建筑设计防火规范》的规定，戊类指的是“常温下使用或加工不燃烧物质的生产”。根据预制舱的生产流程，属于完整的建筑构造，不论从前期的生产制造还是后期的运行运维，均符合生产的火灾危险性分类中的戊类特征，由此可以确定预制舱的火灾危险性是戊类。

（2）预制舱耐火等级的确定

预制舱的耐火等级也是预制舱式变电站防火消防设计的关键因素，需结合实验室检测从舱体组成

结构进行综合分析判断。高性能纤维预制舱的组成结构为：舱体和舱顶均采用玄武岩纤维复合预制件，这是一种把玄武岩纤维作为混凝土改性掺料，以低碱快硬硫铝酸盐水泥作为胶凝材料，与高分子材料、砂和化合物等多种集料按特定比例混合搅拌后，高压喷射浇筑在用槽钢、钢筋制作成型的模具内，经24 h静置形成的纤维复合预制件产品。该预制件经国家防火建筑材料质量监督检验中心检验，燃烧性能等级为A级（不燃材料），耐火性能为3 h。预制舱底框采用H型钢和槽钢焊接而成，并进行热镀锌工艺处理，户外使用寿命超过40年。舱底框与舱体通过复合预制件内的预埋件焊接连接，保证刚强度。预制舱舱门采用甲级防火门。根据相关规定，高性能纤维预制舱耐火等级为一级。

2. 预制舱式变电站防火间距

（1）变电站预制舱是否受消防规范限制

变电站预制舱是设备还是建筑，是否受消防规范限制，这个问题是预制舱式变电站防火间距设计和确定的基础。传统观点认为防火间距仅适用于建筑物，而变电站预制舱属于设备，不受消防规范限制。但是，预制舱实质上是一个内部设置有电力设备、空调器、加热器、风机、照明和辅控等设备，带有舱门的能够确保舱内设备正常运行和运行调试人员现场作业的箱式结构。GB/T 50504—2009《民用建筑设计术语标准》2.1.4条对建筑物定义为：用建筑材料构筑的空间和实体，供人们居住和进行各种活动的场所。预制舱的火灾危险性和耐火等级分别为戊类和一级，因此，预制舱属于建筑物，受消防规范限制是毋庸置疑的。

（2）防火间距的识别

防火间距是指为防止着火建筑在一定时间内引燃相邻建筑，给消防扑救留有适当空间的间隔距离，重点考虑两个关键因素：火灾和爆炸。根据变电站预制舱内部电力设备的组成和布局，须着重考虑三个方面的防火间距设计准则：一是预制舱式变电站与站外其他建筑之间的防火间距；二是变电站内各模块预制舱之间的防火间距；三是站内油浸变压器、油浸电抗器与相邻预制舱之间的防火间距。

1) 预制舱式变电站与站外建筑的防火间距。预制舱的火灾危险性是戊类，耐火等级为一级，把预制舱式变电站作为整体，确定其与站外其他建筑之

间的防火间距，可以按GB 50229—2019《火力发电厂与变电站设计防火标准》变电站建（构）筑物火灾危险性最高的丙类处理，由此预制舱式变电站与站外其他建筑之间的防火间距应不低于10 m。

2) 各模块预制舱之间的防火间距。GB 50229—2019规定：“相邻两座建筑较高一面的外墙如为防火墙时，其防火间距不限；两座一二级耐火等级的建筑，相邻较高一面的开口部位设置有甲级防火门时，其防火间距不应小于4 m。”预制舱的火灾危险性和耐火等级分别为戊类和一级，其防火间距可以不限，但是由于预制舱体均设置有甲级防火门，因此各模块预制舱之间的防火间距均不应低于4 m。值得注意的是，相邻两座建筑两面的外墙均为不燃性墙体且无外露的可燃性屋檐，每面外墙上的门面积之和不大于外墙面积的5%，且门不正对开设时，其防火间距可减少25%。由于预制舱的防火门均设置在长度方向，不正对开设，因此各模块预制舱之间的防火间距可以减少至 $4\text{ m} \times (1 - 0.25) = 3\text{ m}$ 。

3) 油浸变压器与相邻预制舱的防火间距。油浸变压器与相邻预制舱的电气连接一般通过管母线或者电缆，从建设成本角度考虑，防火间距越小，越节省管母线，电缆长度也越小，但需满足消防设计的防火间距限制要求。

本项目单台油浸变压器油量为13.8 t/台，变压器高压侧相邻110 kV GIS组合电器预制舱，低压侧相邻由10 kV开关设备预制舱和二次组合设备预制舱组合而成的双层预制舱。GIS组合电器预制舱的高度为4.1 m，双层预制舱的高度为7 m，变压器预制舱的高度为5 m，根据GB 50229—2019表11.1.5注2的规定：“相邻两座建筑较高一面的外墙如为防火墙时，其防火间距不限”，因此变压器舱与双层预制舱间的防火间距不限，而变压器舱与110 kV GIS组合电器预制舱的防火间距需要满足表11.1.5中规定的10 m。

4) 油浸变压器与其他带油电气设备的防火间距。根据GB 50229—2019第11.1.7的规定：“110 kV电压等级变电站内，单台油量为2 500 kg及以上的油浸变压器之间，以及与油浸电抗器之间的最小间距为8 m。”需要注意的是，油量为2 500 kg及以上的油浸变压器与油量为600 kg以上的带油电气设备之间

的防火间距不小于5 m。

全模块化预制舱式变电站消防系统设计

在明确了变电站预制舱火灾危险性和防火间距之后,即可对全站消防系统进行设计和研究。主要涉及火灾自动报警系统、预制舱自动灭火系统、消防给水及灭火救援设施和构筑物的防火设计等,主要遵循的标准规范有GB 50016—2014(2018版)、GB 50229—2019和GB 50116—2013。

1. 火灾自动报警系统设计

预制舱火灾自动报警系统应能够主动探测火灾信号,识别火灾早期特征,并触发火灾报警信号,为人员疏散、火灾蔓延延缓和自动灭火设备启用等提供控制与指示。在本工程中,采用了集中报警系统,可同时实现火灾报警和自动消防设备联动,同时还设置了消防控制室。该系统包括消防专用电话、消防控制室图形显示装置、消防联动控制器、火灾探测器、火灾报警控制器、火灾声光警报器、手动火灾报警按钮及消防应急广播等,涵盖消防联动控制、火灾探测报警、系统成套设备、电源及接地和线路敷设等方面的设计。

(1) 火灾探测报警的设计

火灾自动报警系统由触发器触发火灾报警信号。预制舱式变电站消防系统设计时,触发器包括手动火灾报警按钮和火灾探测器两部分。前者是依靠人工,用手动的方式操作;后者自动地按照对应的火灾参数发出相应响应,并发出报警信号。火灾探测器有感温式、感烟式和感温感烟式三种,感温感烟式火灾探测器只有在同时接收到温感、烟感两组信号后才会启动,从而实现对火灾的准确识别。本工程中,在预制舱顶部吸顶安装有两个感温感烟式火灾探测器,可以实现舱内火灾情况的自动监测。此外,还设置有人工火灾报警按钮,以实现火灾报警装置失灵或不及时动作的补救。

(2) 消防联动控制的设计

作为消防联动控制系统的核心设备,消防联动控制器可在火灾报警后经逻辑/人工确认3 s内,按设定的控制逻辑向各受控设备发送联动信号,并接收相关设备的联动反馈信息。本工程中消防联动控制器的输出电压为直流24 V,电源容量满足预制舱内受控消防设备同时启动,并持续维持工作的

要求。

该项设计主要涉及以下几个部分:

1) 超细干粉自动灭火系统的联动控制。预制舱内设置超细干粉灭火装置,舱内电气设备发生火警时,由消防联动控制器发出灭火指令后,启动灭火系统喷射灭火剂灭火。

2) 火灾警报和消防应急广播系统的联动控制。预制舱体外侧设有火灾声光警报器,在确认火灾后由消防联动控制器控制启动变电站的所有声光警报器。此外,还设有消防应急广播,采用消防应急广播与火灾声光警报循环交替方式进行播放。

3) 防烟排烟系统的联动控制。预制舱体上设置通风排烟风机,在每个预制舱体上布置有8个正反转风机,上部布置4个,下部布置4个(尽量靠近地面)。在确认火灾后,由消防联动控制器控制启动风机反转(下进风上出风),用于排出火灾烟尘或促进舱内空气循环。

4) 其他设备的联动控制。消防联动控制器可以自动打开涉及疏散的电动栅杆,进而打开由门禁系统控制的疏散通道门和变电站大门。

(3) 系统成套设备的设计

系统的成套设备包括消防专用电话总机、火灾报警控制器、应急广播、联动控制台、对讲录音电话、图形显示器、打印机及电源设备等。主要涉及以下几个部分:

1) 消防直通对讲电话系统设计。在消防控制室内设置消防直通对讲电话总机和相应的手动报警按钮,同时设置直接报警的外线电话。

2) 消防设备电源监控系统设计。在消防控制室内设有消防设备电源监控器,在消防设备配电箱旁设置电压或电压/电流传感器。当设备电源发生欠电压、过电压、中断供电、过电流及缺相等故障时,电源监控器进行声光报警和记录,并实时显示被监测电源电流、电压值及故障点位置。

(4) 消防应急照明及疏散指示系统设计

消防应急照明及疏散指示系统按HOCEN-EMCS开展相关设计,为集中电源集中控制型系统。集中电源提供灯具主电源和蓄电池电源。在集中电源内部实现输出转换后,由同一配电回路为灯具主电源和蓄电池电源供电,系统应急启动后,蓄电池电源供电时的持续工作时间不小于45 min(其中

15 min为非火灾状态)。消防控制室安装应急照明控制器,主机自带DC 24 V电源装置。疏散照明可在消防控制室集中手动、自动控制。不利用切断消防电源的方式直接强启疏散照明灯。设置疏散通道的灯光疏散指示标志间距不大于20 m,且安装在距舱底部1.0 m以下的位置;疏散照明灯具设置在预制舱舱门的顶部或侧边舱体的上部。

(5) 电源及接地的设计

火灾自动报警系统同时设置有交流电源和蓄电池备用电源。其中,交流电源采用消防电源,蓄电池备用电源包括消防联动控制器、火灾报警控制器自带蓄电池电源及消防设备应急电源。同时,UPS电源装置和消防设备应急电源为消防通信设备、控制室显示装置等供电。消防用电设备采用专用的供电回路,配电线路和控制回路按防火分区进行划分,配电设备有明显标识。

消防系统采用预制舱接地装置作为接地板(共用接地装置),接地电阻值不大于 $1\ \Omega$ 。消防控制室内的电气和电子设备的金属外壳、机柜、机架和金属管、槽等采用等电位联结。由消防控制室接地板引至各消防电子设备的专用接地线选用铜芯绝缘导线,其线芯截面积不小于 $4\ \text{mm}^2$;消防控制室接地板与预制舱接地体间通过铜芯绝缘导线相连,线芯截面积不小于 $25\ \text{mm}^2$ 。

(6) 线路敷设的设计

火灾自动报警系统的消防联动控制线路和供电线路选用耐火铜芯电线电缆,而消防专用电话、消防应急广播及报警总线等选用阻燃耐火电线电缆。预制舱内空调器、照明、安防、消防及环境监控等设备线缆均采用暗敷方式。预制舱本体走线通过侧壁、舱顶采用暗排式布线。舱顶走线通过走线槽或穿线管,舱体侧面走线通过PVC走线槽或管加以保护。火灾探测器传输线路选用不同颜色的绝缘导线,实现明确视觉区分的效果。其中,正极选用红色线,负极选用蓝色或黑色线。

2. 自动灭火系统设计

预制舱内的开关柜设备、二次组合设备、无功补偿及消弧线圈等电气设备在高性能纤维预制舱体的保护下,与外界形成了良好的隔绝,基本不会受外界的影响,使预制舱内的火灾基本不会由外部因素引起。预制舱内的火灾主要是电气火灾,引发火

灾的原因主要是电气设备、电路、带电导体、雷电流、静电和电弧产生了严重的热效应。一些电气设备在正常运行时也会产生电弧或者火花,点燃周围的物质,从而会导致火灾的发生。还有一些是由于静电放电电弧、雷电放电电弧或者是短路等原因导致导线燃烧,从而最终发展为火灾。因此,在进行预制舱内的消防设计时,主要是对预制舱内的电气设备火灾的预防和火灾发生后的灭火设计。

舱内自动灭火系统主要针对除主变压器预制舱、生活预制舱外的其他模块化功能预制舱。目前应用比较广泛的是采用超细干粉自动灭火系统。该系统具有使用成本低、维护花费少、安全性能强及安装简易的优点。当前,超细干粉灭火的通用性非常好,适合于绝大多数的场所。但是在设计时,需要注意防止自动灭火系统误动作:一是要提高装置的起动温度,为了避免消防灭火系统误动作,必须避免系统过于敏感,在电气设备火灾发生时,预制舱内电气设备的温度在很短的时间内迅速升高,由此,可以将灭火系统的起动温度提高到 $100\ ^\circ\text{C}$ 以上,避免在温度过低时误以为发生了火灾而进行灭火,影响电气设备的运行;二是接收温感、烟感两组信号后再起动。预制舱内部发生火灾后,除了出现温度急剧升高外,还会因为电线燃烧等原因产生大量的烟雾。由此,自动灭火系统在同时获取温度和烟雾两种信号之后,才起动灭火系统,实现对火灾的准确识别和灭火。

主变压器的自动灭火系统有水喷雾灭火系统、泡沫喷雾灭火系统和排油注氮灭火系统等。但是对于220 kV及以下电压等级的变电站,主变压器消防由其容量确定是否需要设置固定式灭火装置。根据GB 50229—2019第11.5.4条:“单台容量为 $125\ \text{MV}\cdot\text{A}$ 及以上的油浸变压器、 $200\ \text{Mvar}$ 及以上的油浸电抗器应设置水喷雾灭火系统或其他固定式灭火装置。”本工程变压器容量为 $50\ \text{MV}\cdot\text{A}$,不需要设置固定消防系统。但是应在主变压器场地内按照规范配置一定数量和型号适宜的移动式干粉灭火器。变电站场站内配置消防沙箱、消防铲、消防铅桶及消防斧等作为全站公用灭火设备。

3. 变电站消防给水及灭火救援设施的设计

(1) 变电站消防给水系统的设计

在本工程中,由于变电站采用了全模块化预制

舱的结构形式,实现了无人值班和智能运维,没有主控制楼、继电器室等建筑物,因此全站无丁类建筑,均为戊类建筑,而且预制舱体耐火等级为一级,每个舱建筑体积不超过3 000 m³,对照GB 50229—2019和DL 5027—2015中“变电站内建筑物满足耐火等级不低于二级,体积不超过3 000 m³,且火灾危险性为戊类时,可不设消防给水”的规定,该工程无须设置建筑消防给水系统。但是需要在变电站门口设置警卫室(辅助用房)、保电值班室、备餐间和卫生间,满足变电站日常值守和保电的生活需求。本工程中采用1台生活预制舱即可满足这一需求。

(2) 消防水源及消防车道设计

外部消防用水是火情控制及外部救援的基本手段,根据GB 50794—2014的规定:“消防用水的补充水源为市政自来水,单路供水。”

变电站内设置环形消防车道,车道的净宽度和净空高度均不小于4.0 m,以满足消防车转弯半径要求。同时,消防车道与建筑间无妨碍消防车操作的架空管线、树木等物体。靠建筑外墙侧的消防车道边缘与预制舱体距离不小于5 m,车道坡度不大于8%。

4. 构筑物的防火设计

全模块化预制舱式变电站的构筑物包括围墙、防火墙、电缆沟、预制舱基础、变压器基础及构支架。防火封堵、防火隔板和防火墙设计同时满足耐火极限不低于3 h的隔热性、耐火完整性要求。电缆沟采取防火墙、防火隔板及防火封堵等防火措施。

结束语

高性能纤维的模块化预制舱式变电站具有防火消防方面的独特优势,是未来变电站建设的发展方向。下一步,变电站预制舱的生产企业及行业主管部门还应该在如下方面加强对该类型变电站的研究:一是预制舱式变电站的消防设计生产和验收标准的制定,目前专门针对该类预制舱式变电站的防火消防标准仍然缺失,参考的相关标准只有建筑类和常规土建变电站的设计防火标准,制约了预制舱式变电站的进一步推广应用;二是预制舱式变电站舱体围护结构材料性能的提升,如拉伸弯曲强度、抗冲击性、传热系数及隔声性能等关键物理性能的

提升;三是性价比更高、适用性更强的预制舱式变电站火灾自动报警和自动灭火系统装置的开发研究,为全模块化预制舱式变电站建设模式的进一步推广应用创造条件。EA

(收稿日期:2023-01-18)

参考文献

- [1] 李仲元,杨辅荣,孔宪扬.模块化变电站预制舱应用及设计探讨[J].安徽建筑,2019,26(2):53-55.
- [2] 蔡晶.预制舱式变电站的设计与建造应用研究[J].中北大学学报(自然科学版),2019,40(5):407-413.
- [3] 马云飞,刘文平.智能变电站预制舱技术应用[J].中国电力企业管理,2022(21):42-43.
- [4] 左涛,张新太.高性能纤维预制舱式智能变电站研究与应用[J].高电压技术,2021,47(ZK1):7-12.
- [5] 景建龙,翟红晓,李凤兰.预制舱变电站的技术对比及方案选择[J].能源与节能,2018,(3):106-108.
- [6] 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.
- [7] 塔拉,苏肇,额尔敦毕力格,等.电力工程总图布置中消防设计常见问题分析[J].电力勘测设计,2022(10):31-36.
- [8] 杨晓慰.消防设计在建筑电气中的运用研究[J].建材与装饰,2018(12):64-65.
- [9] 高运动,王剑波.模块化智能变电站预制舱设计方案研究[J].安徽电力,2017,34(1):26-28.
- [10] 应捷,王晖,张佳庆,等.330 kV及以下变电站消防设计技术差异化应用[J].科技创新与应用,2021,11(29):180-183,187.
- [11] 张振,聂建春,张晓妍.内蒙古电网110kV智能变电站模块化建设通用设计[J].内蒙古电力技术,2021,39(4):73-77.
- [12] 崔鲁,王慧,卢小钟,等.城市中心地区全地下变电站消防系统设计研究[J].电气应用,2021,40(6):95-98.