

[变电站]

地埋式箱式变电站的设计与研究

文/杭州电力设备制造有限公司临安恒信成套电气制造分公司 张琪英 徐 石 蓝许梅 张教练 陈 伟 王万亭

设计了一种10 kV地埋箱式变电站，由埋地箱、高压供电系统、低压配电系统、地下变压器、智能控制系统和广告灯箱等组成。变压器置于地下埋地箱内，高压柜和低压柜安装在地面上，外部装饰有广告灯箱，高压与低压开关室实行物理分隔，减小噪声和电磁辐射的同时达到美观市容的目的。

随着城市建设的加快，人民生活水平的提高，部分城市电网负荷逐年增加。这种情况给在人流量高度密集的商业中心区域安装配电设施带来了严峻的挑战。同时，由于政府对城市规划和城市建设的重视，箱式变电站的选址成为一个重要的问题。目前普遍在运的传统欧式箱式变电站受安装位置的限制，不能深入负荷中心。这种情况导致电缆安装量和相应施工成本的急剧增加。同时，0.4 kV低压线路上的损耗和变压器与用户之间的距离有关，损耗随着距离的增加而增加。配电设施布置要求尽可能紧凑，变压器埋于地下的箱式变电站可大大缩小占地面积，是解决传统箱式变电站因占地面积大、不能接近负荷中心而导致选址困难的主要途径。

为了保证地下电力设备的稳定和安全，本文对10 kV地埋式箱式变电站的排水、防水和通风等问题进行了有针对性的设计。

地埋式箱式变电站总体设计方案

由于地面灯箱部分的结构设计较为简单，所以这里主要介绍地埋式箱式变电站的设计方案。本文设计的半地埋箱式变电站由埋地箱、高压配电系统、低压配电系统、地下变压器和智能控制系统组成。整体而言，箱式变电站采用三角形设计结构。地埋式箱式变电站的结构为：首先将10 kV电缆通过高压馈线连接到高压柜上，高压柜由进线柜、出

线柜和高压计量柜组成。其次，将高压馈线与埋地变压器连接，实现降压功能。低压馈线通过变压器与低压柜连接。低压柜由低压进线柜、计量柜和低压出线柜组成。最后将低压馈线与电气分线箱连接，从而实现了降压和输电的过程。

1. 箱式变压器外壳设计

对于地埋式变电站，其散热和密闭性就显得至关重要。本文所设计的地下变压器的外壳是用A3优质钢板制成的。箱体整体采用耐候钢板整体全焊结构（油箱壁板、散热片板厚不小于6 mm，油箱顶板和底板采用板厚不小于12 mm），实现了全密封结构。箱体材料的厚度保证了箱体有足够的机械强度，使变压器箱体能承受70 kPa压力而不渗油，确保了变压器箱体的密封性能。为了提高散热效果，在壳体的主体上设置若干散热器，平行布置。

2. 高压电气部分设计

高压柜选用气体绝缘环网柜，具有全绝缘、全密封和全天候特点。高压柜由高压进线柜、计量柜及高压出线柜组成。高压带电部分安装在不锈钢外壳内，填充压力为0.14 MPa的SF₆气体或环保气体，无外露导电部件；负荷开关和接地开关选用三位开关，简化了相互连锁。在本设计中，采用了双侧可扩展单元间隔的充气柜，其优点是既缩短了维修时间，又保证了供电，扩展相对方便。与现有的充气柜的共箱封闭单元相比，用户可以直接通过母

线连接器扩展单元增加一条新的馈线。

3. 低压电气部分设计

低压开关柜由低压进线柜、计量柜及低压出线柜组成。设计采用三合一机柜，体积为 2.304 m^3 （ $2.4\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ ），可减少 1.5 m^3 的体积，与现有低压柜相比，在安全距离内预留出足够的空间供设备散热。

变电站安全性设计

1. 箱体防水设计

主要是变电站的变压器箱体部分的防水处理，箱体要求全密封，可浸没于水中。经过近两年的样机测试，设备的过道、维修通道、电缆入口以及循环通风口等密封点均能够承受地下水的渗透压，保持墙体干燥。变压器箱体表面采用特殊防锈处理，保证15年以上不锈蚀，实现了优秀的防腐性能。

箱体主要由三部分组成：第一部分为集水区，由产品槽、接入口、开盖、波纹形箱壁、底座和排水总管等部分组成，这部分的作用是将水箱内的水直接排至市政排水管；第二部分是维修部分，由接入口和开盖组成，小检修口主要用于人员维修和小部件的更换，大开盖主要用于大型部件的维修更换；第三部分为罐体，由开盖、波纹形箱壁和底座组成，这三部分构成了密闭空间。油浸式变压器的箱体和箱盖，通过胶条用法兰密封，为了方便紧固螺栓，防止螺栓的腐蚀，在两侧增加棒材，增强外壳的防水性能。

2. 排水系统设计

地埋式箱式变电站有两个贮水池。水箱收集地面雨水，并与市政排水管相连。为保证密封防水功能，设置两道防线。第一道防线：如果发生洪水，地下水就会上升，或遇突发暴雨，暂时不能降低水位。这种现象导致储水罐无法排水。这时会激活排气阀系统，自动关闭通风阀，防止地表水进入箱体，保证设备正常运行。第二道防线：在箱体的设计中有一个架空层，与潜水泵排水系统形成第二道防线，如果出现渗水或阀门故障，潜水泵将接收液位控制器的启动指令，接到指示后，将水排入水箱，再排入市政管道。

3. 通风系统设计

通风系统的主要功能是促进进出箱体的冷热气

流的交换，从而达到散热的效果。利用箱体外风的风压和由内外温差形成的热压作为驱动力。空气从通风口进入盒子，并在重力的作用下向下移动，空气通过插板的作用移动到变压器的底部。加热后的空气向上流动，最后的空气从通风口的另一侧流出。整个过程形成了空气的自然循环。

4. 广告灯箱的保护性设计

根据灯箱式保护外壳的工作性质，设置了三个方面的保障措施：防水防锈、散热设计及安全防护和维护的便捷性。

1) 防水防锈。灯箱式外壳采用厚度 2.0 mm 以上的不锈钢材料制作，外层表面喷氟碳处理，能对抗紫外线和盐雾腐蚀，耐候能力达15年以上。灯箱顶部等处设计防水密封结构，确保在极端恶劣风雨天气情况下不会进水。

2) 散热设计。在灯箱外壳底部和侧面设计了散热百叶和散热孔，既考虑了地坑基础的散热和高低压柜体的散热出口，同时也兼顾了防雨的要求。

3) 安全防护和维护便利性设计。广告翼表面板为高强度钢化玻璃，防撞击性能好，出现意外情况被撞碎后也不会伤人。在设计时，着重考虑供电维护工作的便利性，灯箱采用侧开门结构，极大地方便了对高压侧关合、分断和故障排除（例如更换高压熔芯）；而在低压侧抄表时更无须打开灯箱门，开启侧开门中部抄表小门就可完成。另外，灯箱式外壳的外门均可上翻旋转打开，配有气缸杆助力，并另加固定支撑杆，以保证检修和换广告画时操作方便安全。而对于较易损坏的变压器过载散热风扇，设计上也要考虑周详。灯箱下面的防水百叶窗封板很容易拆卸下来，便于散热风机的更换。

5. 变压器安全性设计

对于地下式变压器本体，每台本体产品在出厂前均经过严格的浸水运行实验测试，把变压器浸没在水下 12 h 后进行耐压和绝缘电阻测试，确保产品运行时在发生浸水的情况下也是安全可靠的。

电缆头的密封是考验变压器密封的另一个关键。地下式变压器高压电缆头采用进口全密封、全绝缘EDPM肘形电缆插头，低压电缆头采用全密封、全绝缘LSR硅橡胶预制式电缆头，密封、绝缘情况非常优秀。同时，电缆头表面配有半导体层并

用于接地，确保变压器整体表面零电位，完全适应于产品浸水运行。为了保证更高级别的密封，在采用全绝缘电缆头的情况下，还在电缆头处加装了一个透明密封保护外壳，实现双重保护。

在变压器散热设计方面。首先是变压器绝缘油的选择，变压器使用45#优质环烷基变压器油，既加强地下式变压器油箱内外的热交换能力，又具备优良稳定性和抗氧化性能，确保变压器和负荷开关在油箱内长期运行。虽然进口环烷基变压器油价位比国产变压器油高，但因为环烷基油无须加入添加剂就能在极低温度下继续流动，而其良好的黏度-时间特性，使得在温度升高时油的流动速度加快，确保变压器具备良好的散热效率，其散热能力比普通变压器油提高10%。

其次，散热器采用板式散热片结构，比普通片式结构散热效率提高5%，提高了散热能力。通过防水、防潮、防腐、密封以及散热等关键工艺，保证了地下变压器的可靠免维护性能，为客户提供了高质量的产品。

箱式变电站的安装与维护

1. 预制式地下基础设计方案

根据地下式变压器使用环境、使用条件的特殊性，在地坑箱体的设计上重点考虑散热问题、防水防腐和维护便利性。

(1) 防水防腐问题

地坑箱体采用防水防腐及密封设计，并采用耐候钢板焊接结构。

(2) 地坑盖板的密封

景观式地埋式箱式变电站地坑基础盖板与地坑基础之间采用进口橡胶密封条进行防水处理，确保地表水、地下水及其他杂物不能进入地坑内。

(3) 排水装置

预制式基础内部安装了潜水泵及液位控制器，当因暴雨、洪涝等意外情况而引起地坑内部进水时，可自动启动排水系统进行排水。

(4) 维护便利性

地坑盖板为活动吊装结构，给变压器检修、更换带来便利。在地坑基础的设计上，把地坑盖板和地坑箱体之间的连接做成活动装配方式，即在需要对变压器进行大修或更换时，可以直接把地坑盖板

单独吊起，取出变压器，而无须拆卸高低压灯箱，大大缩短了维修时间。

(5) 地坑盖板的维护性设计

地坑盖板上设有地下式变压器检修孔盖，检修孔有防水隐藏式门锁，检修孔打开后由气缸结构元件支撑定位，通过检修孔可在基础上面操作负荷开关、分接开关和插入式熔断器，并巡查变压器的运行状况。而且检修孔与地坑盖之间采用耐候性能优良的汽车用密封胶条进行密封，防止地面水流进地坑内。

2. 整机总装设计方案

整机总装后需要关注的问题是各个组成部分通风散热功能的协调配合、设备的总体安全防护及维护便利性。

(1) 散热结构

产品总装时，在地坑基础上配置了新型景观性通风罩作为热气流的出口，从而完成了整体设备的散热构造。

(2) 安全防护

景观地埋式箱式变电站总装完成后，产品实现了二层门防护结构，防护等级达到IP56。第一层门采用不锈钢灯箱外门，由不锈钢板和钢化玻璃制成，防雨防尘，同时设置门锁，广告维护单位只能打开第一层门；第二层门为仪表及开关操作门，只有需要检查、维护时才能打开。二层门的防护方式需确保灯箱外壳被破坏后，高、低压柜仍然达到一个完整独立的保护水平。

(3) 灯箱基础的稳固

产品总装后，灯箱安装在地坑基础之上，地坑基础与中间的地坑用钢架连接。

建设成本和优势分析

1. 经济效益分析

在路上或居民社区中，地埋式箱式变电站可以很好地取代小中转站，箱式变电站可用于多个不同类型的变压器（见表1）。在经济效益分析中设定变压器的满载操作时间是2 500 h，节省电缆的长度设置为100 m，馈线截面积为50 mm²，按照其设定的平均电价为0.673 5 元/kW·h。根据供电部门低压电缆年度线损的计算方法，计算不同变压器容量损耗，具体数值见表2。

表1 箱式变电站容量

变压器容量 /kV·A	额定电流/ A	出线支 路数	出线支路 平均电流/ A	电缆截 面积/ mm ²	功率 因数
100	144	5	20	50	0.8
200	288	5	48	50	0.8
315	455	6	70	50	0.8
400	577	6	90	50	0.8
500	722	6	95	50	0.8
630	909	8	100	50	0.8
800	1 154	10	100	50	0.8

表2 变压器容量损耗

变压器容量/ kVA	出线电缆 线损/kV·A /m	节省电缆 长度 /m	降低低压 电缆损耗/ kW·h	年节省 电费 (元CNY)
100	1.13	100×5	565	380.527 5
200	6.5	100×5	3 250	2 188.875
315	13.82	100×6	8 292	5 584.662
400	22.84	100×6	13 704	9 229.644
500	25.45	100×6	7 635	5 142.172 5
630	28.20	100×8	22 560	15 194.16
800	28.20	100×10	28 200	18 992.7

线损的计算公式为

$$\begin{aligned}
 W &= 3I^2RT \\
 R &= \frac{\rho L}{S}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中， W 为线功耗； R 为线电阻； T 为功耗时间； ρ 为电阻率； L 为线长； S 为截面积。

从以上例子的结果可以得出：变电站馈线数越高，馈线截面积越小，低压电缆损耗值越大。虽然地埋式箱式变电站的投资成本高于传统箱式变电站，但从节约电缆材料和降低线损的角度，可以极大地延长变压器的使用寿命。

以一台630 kV·A的变电站为例，地埋式箱式变电站的造价比地上箱式变电站高144 354元，50 mm²的铜电缆每米的价格为95元，可节省电缆投资高达76 990元。根据以上数据，收回成本只需要4.43年，而一台全新的变压器正常使用寿命为15~20年。由此可见，地埋式箱式变电站具有较高的经济效益和应用价值。

2. 其他优势分析

(1) 高可靠性

地埋式箱式变电站选用的地埋式变压器箱体全密封，高低压进出线采用防水全密封、全绝缘以及全屏蔽的接线方式。保证了地埋式变压器的防腐性和密封性。整体防护等级达到IP68，可浸没在水中运行，可抵御洪涝灾害，所有各项措施保证地埋式箱式变电站20年的使用寿命，可以免维护、免检修，有效提高了供电系统的可靠性。

变压器地坑基础设计和制作时进行了防水及排水考虑，顶部通风孔具备有效的防雨防水功能，侧部及底部用特种防水材料处理，渗水不能侵入，在底部安装有受自动排水系统控制的潜水泵。

(2) 节能降耗

节能降耗已成为全社会的共识，地埋式箱式变电站选用S11系列低损耗的地埋式变压器，与普通变压器相比，空载损耗低30%，负载损耗低15%。如果采用非晶合金铁心的地埋式变压器，其空载损耗下降了80%。

(3) 降低噪声

箱式变电站对环境的影响最大的是变压器的噪声。如果箱式变电站安装在离居民窗口较近的地方，在夜深人静时其噪声不可避免地会影响居民的日常生活。将变压器安装在地下，噪声可以明显下降，对居民生活几乎没有影响。

(4) 与环境协调

一般的箱式变电站占地面积较大，难以很好地与环境协调。而地埋式箱式变电站因为变压器安装在地下，不影响周围环境，安装在地面的配电箱体积小，很容易与周围环境相协调。

(5) 为客户创造价值

地埋式箱式变电站占地面积小。在生活小区里可以取代传统的配电室，减少配电房的建设，投资效益非常明显。安装在城市主干道及高速公路上或高档小区的埋式箱式变电站，地面上为广告灯箱式的开关设备，大幅的广告灯箱位置将为客户带来长期的广告收益。

结束语

地埋式箱式变电站可以有效地解决某些地区电力设备区域与环境协调的问题。其应用范围可以是道路、桥梁和隧道等小负荷供电工程，也可以应用于人口密集的城市中心、街道、机场、港口、停车场和工业园区，以及覆盖面积大、对高度和外观有严格要求的居民区、旅游景点等。该类型变电站充分利用了地下空间，安装位置灵活多变，可以进一步提高土地资源的利用率，减少对该地区环境的影响。同时，地埋式箱式变电站靠近负荷安装，可有效减少低压电缆馈线，节约低压电力线损耗，从而达到节能、环保和可靠运行的多重效果。

(收稿日期：2021-12-17)