

# 一次导线与接线端子压接电阻 增大原因分析及改善

张国兴<sup>1</sup> 刘惠姣<sup>2</sup> 王建国<sup>1</sup>

(1. 北京赛瑞斯国际工程咨询有限公司 2. 保定亚惠电力科技有限公司)

**摘要：**配电设备的安全运行，依赖于制造工艺和后期维护管理的双重保障。制造过程中若存在工艺不足，必须在后期运维中及时修复，否则将威胁设备安全，甚至可能引发电气火灾。一起配电室无功补偿柜起火事件，经深入调查与分析，发现火灾的诱因主要源于制造工艺问题。特别是在低压配电系统中使用接触器进行无功补偿的装置，其连接导线的制作工艺至关重要。为了避免电气火灾的发生，建议在制作连接导线时，对接线端子冷压后进行搪锡处理，可以有效降低接触电阻，减少发热，提升设备运行安全。通过解决方案在工程中的应用验证，能为配电设备的安全运行提供有力保障。

**关键词：**电气火灾；无功补偿；接线端子；接触电阻；接触器；电容器

## 0 引言

某企业配电室某日早上 1AA2 无功补偿柜突发大火，1AA1 框架断路器跳闸保护，灭火后因用电需求，采取了临时隔离故障设备的供电措施。随后由设备科组织相关技术人员对现场发生事故的设备进行调查、取证、分析，最后论证了事故发生的原因及经过。

## 1 事故情况简介

配电室电容柜发生爆炸并起火（见图 1），事故造成进线柜断路器保护跳闸，高压侧出线柜断路器因为下一级低压断路器保护动作，短路电流未达到整定值，没有动作，现场人员紧急高压停电并闭合接地刀，做好标识及隔离措施，停电并灭火。灭火后根据公司用电要求采取相应措施：一是隔离故障设备，以

便后期维护；二是维护好因起火引起的母线绝缘，做好母线绝缘措施并测量好绝缘阻值，快速地保证用电设备的电力供应。经过现场紧张的施工和检测，最终在下午 3:30 分恢复了设备的供电。



图 1 无功补偿柜起火照片

## 2 事故原因分析

### 2.1 设备的基本构成

发生起火事故的设备是无功补偿柜，事故发生时，设备处于运行状态。无功补偿柜的主要功能是提高功率因数，当电力系统的无功功率偏低时（根据供电营业规则要求  $\cos\phi \geq 0.9$ ），电力部门会对用电客户进行罚款，具体体现在电力缴费单中的无功功率调节费上。较高的功率因数可以提高变压器的使用功率，降低线路损耗，延长用电设备的使用寿命。经查该设备是在 2013 年 9 月生产并安装投入使用的，设备已过质保期，设备实际额定无功补偿功率为  $25 \times 10 \text{kvar}$ ，无功补偿投切控制为接触器投切，组合方式为熔断器+接触器+电抗器+电容器的方式补偿，如图 2 所示。每 1 路接触器额定电流 95A，投切控制 2 只 25kvar 的电容器（电容器额定电流  $35\text{A} \times 2$ ），熔断器、接触器、电抗器一次接线导线选用为 BVR-25mm<sup>2</sup>，电容器导线选用为 BVR-10mm<sup>2</sup>，导线的连接采用 OT 铜接线端子压接，端子压接未搪锡。

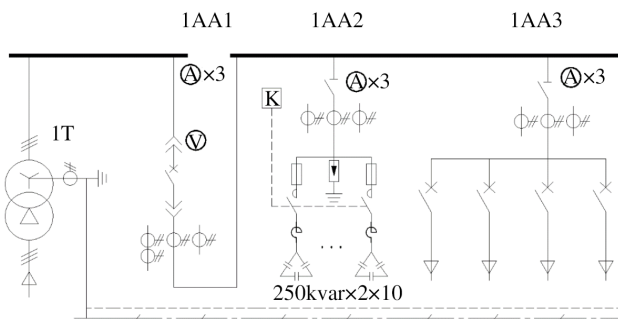


图 2 无功补偿柜系统示意图

### 2.2 运行工况分析

从投入组合的运行方式看，故障设备组合方式为 1 台接触器控制 2 支并联电容器，单台设备的无功补偿容量在控制电路减半的情况下满足了设计回路数量要求。此种组合方式的优点是二次控制电路得到一定的简化，一次熔断器、接触器、电抗器在安装数量上

也相应减半，在一定程度上也降低柜子的排列空间和投资成本；缺点是单路投切的电流较大，补偿容量的投入和切除台阶级别较大，即在电力系统无功补偿容量变化不大的情况下，无功补偿电容器会在补偿控制器的控制下，频繁投切电容器，不利于设备的运行。如果每一路电容器投切控制采用单路控制，一次组成的元器件型号会有减小，如熔断器、接触器、电抗器、连接导线，但数量却要成倍增加，同时因为补偿回路数量的增加，也会引起柜体设计空间的增大，导致最终的成本增加，所以设备生产厂家最终的方案选择是采用 1 台接触器控制 2 支并联电容器。

从组合的投入运行方式看，投入 1 组的电容器容量为  $25\text{kvar} \times 2$  支，可根据无功功率计算公式，得出电容器运行投入时的运行电流，从而论证一次回路元器件的选型正确性，如下：

$$Q = \sqrt{3}UI\sin\phi \quad (1)$$

代入公式得：

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3}U\sin\phi} = \frac{25000 \times 2}{\sqrt{3} \times 400 \times 1} = 72.17(\text{A}) \quad (2)$$

式中， $I$  为电容器无功补偿电流，A； $Q$  为电容器无功补偿功率，var； $U$  为低压侧电源电压，V； $\sin\phi$  为功率因数角，此处负载为纯电容  $\sin\phi = 1$ 。

根据计算所得每组 2 支电容器投入运行电流为 72.17A，代入一次系统中的元器件，分析其设计选型是否符合技术要求。具体论证如下：熔断器选型为 RT16-0/125A，额定电流为 125A，电抗器选型容量为 50kvar 带 2 支 25kvar 电容器，接触器选型额定电流为 95A，一次导线选型 BVR-25mm<sup>2</sup>，导线载流量在运行环境 40℃为 105A，电容器导线选型 BVR-10mm<sup>2</sup>，导线载流量在运行环境 40℃为 59A，元器件选型额定电流值和一次导线载流量均大于实际运行电流值，理论上证明一次元器件选型及导线选用正确。

### 2.3 事故产生的原因及过程分析

从事故设备图 1 中看，烧毁最严重的部位是对电容器投切控制的交流接触器，初步判断事故的起因和发生点在接触器上。由于设备烧毁严重，配电室恰好有同批次运行设备，于是先从运行正常的设备入手，查看分析设备运维情况和制作工艺。设备中作为投切控制的接触器额定运行电流为 95A，控制电源来自主柜无功补偿控制器，查询产品技术资料得知，该接触器产品介绍适用范围可应用于各种类型的控制系统，所以排除选型问题，前面也分析了事故设备其他元器件选型，均符合技术要求，从而排除产品的设计问题。

排除接触器设计选型因素后，事故的起因点重点应放在设备的制造工艺或运行维护管理因素上。测温检查过程中，发现接触器运行温度普遍偏高，温度在 95~135℃左右，而一般接触器的正常温度在 25~65℃，接触器本身运行异常。停电检查发现接触器一次接线端子和导线存在发黑现象（见图 3），且端子压接部位呈现开口状。此时接触器发热原因初步确定为接线端子和一次导线压接后接触不实。导线和接线端子接触抱紧力度小，导线和接线端子接头处接触电阻过大，产生发热现象。在实际运行中，导线和接线端子连接处起热后的接触电阻会变大，后起热更为严重，形成恶性循环，接线端子和导线压接不实产生的热量最终在接触器和导线上传导，并向周边辐射。这种情况下，日常的运维人员进行螺丝紧固的运行维护方式是无法解决导线和接线端子接触不良问题的。



图 3 接线端子和导线发黑情况

## 2.4 一次导线和接线端子压接不实原因分析

根据设备的生产日期和投入使用时间分析，设备已经投运 10 年左右。一次导线和接线端子在设备运行几年之后才发生接触不良的问题，说明设备在运行初始阶段，一次导线和接线线鼻是接触良好的。经分析，设备在运行过程中，受到其他因素影响，致使一次导线和接线端子之间结构发生变化。首先查看一次导线和接线端子，一次导线型号为 BVR-25mm<sup>2</sup>，为铜芯聚氯乙烯绝缘多芯软电线；接线端子采用 C45-25 插片冷压接线端子。一次导线和接线端子的连接采用压接工艺，压接是在导线和端子接触区域施加压力使其成型，实现紧密连接的一种工艺。具体的实施是将剥好的导线插入接线端子的管型压接孔位中，使用压接工具对端子的管型压接部位向内施加压力，使其和管内的导线紧密结合在一起，确保端子和导线紧密贴合，没有间隙。这个过程中，导线受到套管的挤压，在纵向和横向两个方向上均发生形变，形成冷焊。在这个过程中，导线与套管内表面的原氧化膜变形破裂，导线与端子套管内的纯净金属表面充分紧密接触，保证了导线和接线端子的接触性能。

经过压接，一次导线和压接端子之间形成不可分离的、长时间可靠的电气和机械连接，这意味着导线和端子之间的连接电阻非常低，电流能够顺畅地通过而不会产生过大的热损耗；也意味着端子和导线在受到外力时不会分离或移动。它们应该紧密地结合在一起，以保持稳定和可靠的连接，能够承受多次的插拔和振动，而不会出现明显的退化。经查现场所运行的设备都不同程度地出现接触器一次接线端子和导线发黑现象的问题，从而判断出导致出现此问题有两个因素，一是接线端子的压接工艺，二是接线端子的设计选型。分析同批次的生产制造不可能为一个人作业，不会全部都出现类似问题，初步排除压接工艺，重点转移至接线端子，仔细查看接线端子，发现管套闭

合有明显的开口，如图3所示。接线端子采用C45-25插片冷压接线端子是应该将套管边缝封焊，而该批接线端子却没有进行套管边缝的封焊。没有进行边缝封焊的接线端子，在连接导线压接之后，需要进行搪锡工艺的处理，目的是防止压接不紧和套管抱紧力不足及套管机械疲劳，但是后期搪锡工艺没有进行，或者在接线端子弹性范围内，没有考虑套管局部塑性变形的影响。在运行过程中，接触器上的导线和接线端子不断地承受其震动引起的机械应力，另接触器运行时温度较高，导致一次导线在接线端子套管内受热膨胀，而停止时，温度下降，反反复复。而端子内的导线体积也在反复膨胀缩减，导线体积膨胀的力作用在端子套管上，将未进行边缝封焊的套管内部空间慢慢的撑大，内部空间撑大后，导线和端子的接触良好性逐渐恶化，导线和端子接触位置开始严重发热。热量传导的接触器的绝缘部位，绝缘材料开始热分解和碳化。

根据体积计算公式：测量接线端子套管内圆直径8.5mm，外圆直径12.1mm，长12mm，计算套管体积为 $698.5\text{mm}^3$ ；又根据体积计算公式：一次导线截面为 $25\text{mm}^2$ ，因为插入套管内压接，长度和套管相同也为12mm，计算导线体积为 $300\text{mm}^3$ 。套管热膨胀主要方向为套管内外壁两侧，向外作用力忽略，向内和导线热膨胀相互作用，简单视为套管内部体积为 $698.5/2+300\text{mm}^3$ ，即 $649.25\text{mm}^3$ 。查阅常用材料的体积膨胀系数，温度范围在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 时铜的热膨胀系数为 $16.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，这意味着当温度升高 $1^\circ\text{C}$ 时，铜材的体积将增加 $16.5\times 10^{-6}$ 倍。代入一组实测值，导线在套管内温度上升了 $100^\circ\text{C}$ ，此时套管及内部导线体积增大为：

$$(698.5/2+300\text{mm}^3)\times(1+16.5\times 10^{-6}\times 100)=650.32\text{mm}^3 \quad (3)$$

$$\Delta V = V - V_0 \quad (4)$$

由式(4)已知初始套管和导线压接后的体积和升温后的体积，求得：

$$\Delta V = (650.32-649.25)\text{mm}^3=1.07\text{mm}^3 \quad (5)$$

式中， $\Delta V$ 为体积变量； $V$ 为变化后的体积； $V_0$ 为原体积。

此时套管内部导线的体积增大了 $1.07\text{mm}^3$ 。内部的体积增大导致套管的边缝开裂增大，当接触器停止运行时，温度下降至正常温度，边缝因自身塑性回弹。长期如此循环，受热情况下加速套管的机械疲劳，套管对导线抱紧力度逐渐减小，边缝已经不能回弹复位，当接触器停止工作时，温度下降至初始温度，接线端子套管内部空间与导线体积出现 $1.07\text{mm}^3$ 的间隙误差，两者接触情况严重恶化。

为验证运行设备中的一次导线和接线端子接触良好程度，试验对比采用焊接封口端子接线的阻值，测试方法如下。

### 2.4.1 现场导线阻值的测试方法

拆除现场平时运行状态的导线，测试2个接线端子之间的阻值，得出一组数据，测量长度为0.5m，这组数据包含新旧接线端子和旧导线阻值。

### 2.4.2 新压接导线阻值的测试方法

取导线长度为0.5m，将两侧导线绝缘层剥开，用2个新的端子压接良好，测试2个接线端子压接片之间的阻值，得出一组数据，这组数据包含2个接线端子和新导线阻值。

### 2.4.3 备注事项

为保证数据的真实性，新压接导线选用原有设备导线部分。

测试仪器：胜利仪器(VICTOR)直流低电阻微电阻测试仪，测试范围为 $1\mu\Omega\sim 300\text{k}\Omega$ 。测试数据如表1所示。

表 1 现场和新压接导线阻值数据比较

序号	现场导线阻值 / $\mu\Omega$		新压接导线阻值 / $\mu\Omega$		实际压降阻值 / $\mu\Omega$
	两个端子之间	导线阻值	两个端子之间	导线阻值	
1	A	B	C	D	E
2	781	/	390	350	391
3	752	/	392	351	360
4	796	/	392	353	404

经两组测量数据的对比，发现接线线鼻在运行中产生的线损阻值明显偏离常规数据。产生故障的过程具体如下：当无功电容器投入运行时，电流流经一次导线—接线端子—接触器—电抗器—电容器，由于一次导线和接线端子压接不实，在压接接触面产生较大的阻性，一定的接触阻值造成一定的压降和线路损耗。导线电流的平方乘以此处的阻值，即为此处线路损耗功率，线路损耗以热的形式展现，即电流的热效应，从而使一次导线和接线端子处温度逐渐升高。接触器受到高温的影响后，因其吸热比较散热比大，温度不能有效传导散发，热量聚集在接触器，导致接触器本体工程塑料受热逐渐热分解和碳化；热分解会导致材料碳化，形成导电通道，工程塑料碳化后降低了接触器的绝缘性能。

查阅接触器相关资料，其绝缘件制造材料一般为聚碳酸酯（PC）、聚苯乙烯（PS）和聚丙烯（PP）等，材料绝缘性能优良，有优良的阻燃性，为不燃塑料，但是其碳化温度较低，聚碳酸酯（PC）约 280℃、聚苯乙烯（PS）约 240℃、聚丙烯（PP）约 250℃。这些材料在高温环境下发生碳化，开始会分解并释放出一些有害气体和物质，这也是常说的臭味异味，这对接触器的性能和使用寿命产生严重的负面影响。当接触器的绝缘材料长期处于高温环境，继而加速绝缘材料的碳化，碳化的绝缘材料性能逐渐变差，阻值变小，在电压的作用下，绝缘材料成阻性负载，开始加速发热，继而引发绝缘材料自燃，接触器

绝缘材料迅速起火。此时的相间碳化的绝缘材料的阻值还不够小，流过的电流值还不够大，随着火势快速增强、温度的升高，火焰中包含大量等离子体，这些等离子体提高了设备电气间隙空间的电导率，从而引发设备内部的相间弧光短路。此时上级熔断器快速熔断保护，但接触燃烧产生大量的光热，引燃了较大范围的可燃材料，同时也破坏了其他电气材料的绝缘，造成更大范围的弧光短路事故，强大的弧光短路电流最终引发上一级进线断路器的跳闸保护。因事故位置处于柜内，柜体具有烟囱效应，火势增强。

查看现场进线断路器保护定值，保护单元模块负载长延时保护定值  $I_R$  为 0.8 倍的  $I_n$ ，整定时间为 6s，短路短延时  $I_{sd}$  整定电流为 2.5 倍的  $I_n$ ，整定时间为 0.2s，瞬时保护动作电流值为  $I_i \geq 4I_n$ 。由现场设备事故图 1 看出弧光短路不是特别严重，分析进线柜断路器跳闸保护为短路短延时或短路瞬时保护动作，当弧光短路相间电流达到预设值条件后，断路器跳闸保护。

### 3 改进措施及建议

理论结合实际，分析并推演了火灾事故的发生，为避免类似事件发生，应采取以下措施：

- 1) 更换有严重发热变色的接线导线，所有的连接导线接线端子进行搪锡处理后再进行连接紧固；
- 2) 更换接线端子发热变色位置的接触器，因为接线端子发热，导致接触器绝缘件损伤；
- 3) 因供电系统谐波电流含量较高，且传统的接触器投切控制的无功补偿装置不能满足现场快速变化的无功需求，在一定程度上增加了连接电缆的发热量，建议后续设备改进加装选用合适的无功补偿及消谐设备，如 ASVG 或 APF；
- 4) 对此类型低压系统进行一次细致的检修维护，并对可疑线路进行电气试验，更换掉有缺陷的电气元器件，将事故隐患及时消除，避免电气火灾或事

故的发生。

## 4 结束语

在低压电气设备系统运行中，无功补偿装置的运行较为复杂，系统中的各个元器件选型、设备的制造工艺，都能够直接或者间接影响设备的安全运行和使用年限。无功补偿装置电容器运行电流大，时间长，容易在有缺陷的部位产生较大的热量，继而破坏材料的绝缘性能，引发电气火灾。在此设备事故中所使用的接线端子，因制造工艺导致压接不够紧固，由于电流的热效应，所以造成导线和接线端子连接处开始起热，继而造成导线和接线端子的接触电阻增大起热形成恶性循环，最终产生的高温将接触器的绝缘材料分解碳化，引发电气火灾事故。采用搪锡处理的工艺对接线端子压接，改造接线后，运行一段时间，检测压接接线端子的温度为 $35.2^{\circ}\text{C}$ ，而改造前的检测温度为 $95^{\circ}\text{C}$ 。由此证明，低压配电系统中采用接触器进行无功补偿的装置，在制作连接导线的时候，接线端子选型套管边缝必须焊接，且端子压接后应采用搪锡处理的制造工艺，避免连接导线在套管内因热膨胀因素，

引起接线压接松动的工艺问题，导致接触电阻偏大，引发电气火灾。

## 参考文献

- [1] 刘东旗，刘艳芹，陈宁，等. 电气火灾的分析和预防 [J]. 中国安全生产科学技术，2011(7): 179-182.
- [2] 林乔禹. 电气线路故障引发火灾的调查事故分析 [J]. 消防界(电子版)，2021: 67, 69.
- [3] 杨晨. 电气线路发热引起火灾的机理分析与预防对策 [J]. 电气应用，2014, 33(6): 90-93.
- [4] 王建涛，李成海. 船舶机舱火灾事故人为因素分析 [J]. 南通航运职业技术学院学报，2021, 20(2): 60-63.
- [5] 刘艳，刘先锋，王绪亭，等. 新形势下港口消防应急现状和对策 [J]. 港口科技，2022(4): 20-23.

(收稿日期：2024-08-02)